Al. Fransua A. Nicolaide Gh. Trifu

MAȘINI ELECTRICE UZUALE

exploatare și regimuri de funcționare

În Ciclul „Montarea și exploatarea echipamentului electric"

Au apărut:

D. Simulescu, M. Huhulescu, V. Caisîn, I. Călin

Aparate de joasă tensiune. Montare, întreținere, exploatare

Vor apărea:

B. Mathe, Al. Curelaru, St. Ogrezeanu

Aparate electrice de înaltă tensiune. Montare, întreținere, exploatare

R. G. Ghemke

Defectele mașinilor electrice, Ediția a II-a (traducere din limba rusă)

Bun de tipar 26.09.1973. Coli de tipar: 26.
Tiraj: 5300+140 exemplare broșate C.Z.: 621.313.

Tiparul executat sub comanda nr. 355, la Întreprinderea poligrafică „Crișana", Oradea
Str. Moscovei nr. 5
Republica Socialistă România

Scanned with OKEN Scanner

26/745.

Prof. dr. ing. Al. Fransua ● Prof. dr. ing. A. Nicolaide ● Ing. Gh. Trifu

MAŞINI ELECTRICE UZUALE

Exploatare şi regimuri de funcţionare

EDITURA TEHNICĂ
BUCUREŞTI-1973

Scanned with OKEN Scanner

Lucrarea tratează problemele legate de exploatarea curentă a mașinilor electrice uzuale, regimurile de funcționare normale, anormale și speciale mai importante cum și aspecte privind funcționarea și exploatarea unor mașini moderne. Totodată sînt prezentate și probleme legate de alegerea mașinilor electrice respective în funcție de condițiile de exploatare.

Cuprins: Transformatorul; Mașina asincronă; Mașina de curent continuu; Defecte și probleme generale de exploatare a mașinilor electrice.

Prin conținut și tratare, cartea are un caracter practic și este accesibilă unui cerc larg de cititori. Ea se adresează în special tehnicienilor și inginerilor electricieni care se ocupă cu exploatarea mașinilor electrice în diferite ramuri ale economiei naționale (întreprinderi industriale, șantiere, transporturi etc.), studenților și elevilor școlilor tehnice din domeniul electrotehnicii, electroenergeticii, cum și din toate domeniile în care se utilizează energia electrică.

Recenzie: ing. **Mihail Pavel** și ing. **Const. Rușanu**
Control științific: ing. **Eugen Niculescu**
Redactor: ing. **Paulina Dumitrescu**
Tehnoredactor: **Elena Geru**
Coperta: **Valentin Vișan**

Scanned with OKEN Scanner

Scanned with OKEN Scanner

PREFAȚĂ

Funcționarea în bune condiții a instalațiilor de utilizare a energiei electrice depinde în cea mai mare măsură de exploatarea rațională a echipamentului electric, în cadrul căruia mașinile și transformatoarele ocupă un loc de importanță deosebită.

Adresîndu-se muncitorilor de înaltă calificare, maiștrilor, tehnicienilor și subinginerilor din întreprinderile industriale sau din alte ramuri ale economiei naționale, inclusiv celor care se ocupă cu exploatarea și întreținerea mașinilor și transformatoarelor în centrale și stații electrice, lucrarea a fost elaborată la un nivel mediu al cunoștințelor de specialitate, fără a face apel la cunoștințe pretențioase în domeniile matematicii sau electrotehnicii.

Au fost abordate probleme curente privind punerea în funcțiune a mașinilor și transformatoarelor electrice, întreținerea acestora în timpul exploatării, principalele defecte sau regimuri anormale. A fost acordată o atenție deosebită definirii condițiilor de exploatare. În același timp, în lucrare au fost prezentate și unele probleme de funcționare care implică răspunderi mai ridicate ale personalului de exploatare. Putem cita, din ultima categorie: determinarea parametrilor electrici ai mașinilor și transformatoarelor pe baza datelor cuprinse în cataloage, metodele de pornire a motoarelor asincrone de utilizare curentă, autopornirea, funcționarea motoarelor asincrone alimentate nesimetric, conexiunile transformatoarelor și metodele de verificare a acestora, sistemele de excitație statică a motoarelor sincrone.

Un capitol aparte al lucrării este consacrat metodelor de reducere a zgomotului în exploatarea mașinilor și transformatoarelor, problemă de o deosebită importanță pentru crearea unui mediu de lucru corespunzător. Se dau de asemenea informații utile privind limitele de încălzire admisibile în exploatarea mașinilor și transformatoarelor, ca și influența suprasarcinilor asupra duratei de serviciu a acestora. Un alt capitol tratează despre curenții care apar în lagărele mașinilor electrice,

atunci cînd acestea nu sînt montate corespunzător, situaţie care poate duce la defecte cu consecinţe neplăcute.

Autorii au încercat o prezentare concisă şi clară a diferitelor probleme de exploatare şi întreţinere a maşinilor şi transformatoarelor electrice. Ei speră că au reuşit să împărtăşească din experienţa lor un număr de cunoştinţe utile tuturor acelora care au de rezolvat astfel de probleme în activitatea lor practică.

AUTORII

Scanned with OKEN Scanner

CUPRINS

1. Alegerea mașinilor electrice, în funcție de condițiile de exploatare 13

1.1. Serviciul de funcționare 13
1.2. Altitudinea locului de montare în exploatare 18
1.3. Temperatura mediului ambiant 19
1.4. Natura mediului ambiant și protecțiile necesare 19
1.4.1. Protecția mecanică 20
1.4.2. Protecția specială 21
1.5. Poziția de funcționare 29
1.6. Cuplurile rezistente în perioada de pornire a agregatelor care trebuie deservite de mașinile electrice 29
1.7. Suprasarcini care pot apărea în timpul funcționării mașinilor electrice 29
1.8. Scopul funcțional 29

2. Transformatorul 31

2.1. Determinarea parametrilor electrici ai transformatoarelor trifazate, utilizînd datele din catalog 31
2.2. Conexiunile transformatoarelor trifazate 33
2.2.1. Tipurile de conexiuni 33
2.2.2. Verificarea grupei de conexiuni 37
2.3. Alegerea unui transformator în funcție de condițiile de exploatare . . 39
2.4. Punerea în funcțiune a unui transformator 51
2.4.1. Construcția transformatoarelor 51
2.4.2. Montarea și punerea în funcțiune a transformatorului 60
2.5. Exploatarea și întreținerea transformatoarelor 73
2.5.1. Întreținerea transformatorului înaintea punerii în funcție 73
2.5.2. Întreținerea transformatorului după punerea în funcțiune 73
2.5.3. Exploatarea uleiului 74
2.6. Comportarea izolației transformatoarelor în exploatare 75
2.6.1. Comportarea în exploatare a izolației de hîrtie 75
2.6.2. Comportarea în exploatare a uleiului de transformator 77
2.6.3. Transportul și păstrarea uleiului de transformator 82
2.6.4. Protecția izolației transformatoarelor în exploatare 83
2.6.5. Izolația de hîrtie a înfășurărilor 83
2.6.6. Comportarea în exploatare a transformatoarelor închise ermetic . 85
2.6.7. Transformatoare cu conservator cu membrană elastică 86
2.6.8. Comportarea uleiului în transformatoarele de distribuție care funcționează la temperaturi ridicate 86

Scanned with OKEN Scanner

2.7. Uscarea transformatoarelor 87
2.7.1. Generalităţi 87
2.7.2. Uscarea transformatoarelor în cuvă proprie, fără vid 87
2.7.3. Uscarea prin tratarea uleiului în circuit închis 91
2.8. Conectarea la reţea a transformatoarelor, fără uscare 93
2.8.1. Generalităţi 93
2.8.2. Condiţii de conectare fără uscare a transformatoarelor 93
2.9. Defecte şi regimuri anormale de funcţionare 100
2.9.1. Supraîncălzirea transformatorului 100
2.9.2. Bîzîit anormal în transformator 101
2.9.3. Trosnituri în interiorul transformatorului 102
2.9.4. Străpungerea înfăşurărilor şi întreruperi în înfăşurări 102
2.9.5. Funcţionarea protecţiei prin releu Buchholz 103
2.9.6. Tensiunea în circuitul secundar al transformatorului nu este normală 106
2.9.7. Alte defecte 106

3. Maşina asincronă 107

3.1. Proprietăţile principale ale maşinii asincrone 107
3.2. Determinarea parametrilor electrici ai maşinii asincrone, utilizînd datele din catalogul maşinii 112
3.3 Determinarea parametrilor electrici ai maşinii asincrone, utilizînd încercările de funcţionare în gol, scurtcircuit şi sarcină 116
3.3.1. Determinarea rezistenţei de fază a înfăşurării statorului 116
3.3.2. Determinarea parametilor electrici pentru valori mari ale alunecării 116
3.3.3. Determinarea parametrilor electrici pentru valori mici ale alunecării 118
3.4. Construirea curbei cuplului $M=f(s)$ 121
3.5. Condiţiile de pornire a motoarelor asincrone 124
3.5.1. Pornirea unui motor cu rotorul de tip colivie, alimentat de la o reţea de putere infinită. Determinarea valorii limită a puterii aparente la sistemul de bare, la pornire 125
3.5.2. Determinarea puterii limită a motorului 127
3.5.3. Tensiunea la barele de alimentare a motorului 128
3.5.4. Condiţia cuplului de pornire 130
3.5.5. Durata pornirii 131
3.5.6. Încălzirea înfăşurărilor la pornire 132
3.5.7. Curentul de pornire 132
3.6. Metode de pornire a motoarelor asincrone cu rotorul în scurtcircuit . . 135
3.6.1. Pornirea prin rezistenţe sau reactanţe conectate în circuitul statoric 136
3.6.2. Pornirea prin înfăşurare parţială 137
3.7. Autopornirea motoarelor asincrone 143
3.7.1. Condiţiile pe care trebuie să le îndeplinească schemele de alimentare şi protecţie pentru ca autopornirea să fie posibilă 144
3.7.2. Studiul fenomenelor care apar la autopornire 145
3.7.3. Ridicarea experimentală a curbelor de oprire 148
3.7.4. Condiţia de autopornire 150
3.8. Încălzirea motoarelor asincrone în regim tranzitoriu şi la suprasarcini de scurtă durată 162
3.8.1. Suprasarcini 164
3.8.2. Încălzirea la pornire 166
3.9. Sincronizarea motoarelor asincrone 169
3.9.1. Curentul continuu de excitaţie 170
3.9.2. Încălzirea înfăşurării rotorului 171
3.10. Funcţionarea maşinii asincrone ca generator 172
3.10.1. Funcţionarea în gol 172
3.10.2. Funcţionarea în sarcină 175

Scanned with OKEN Scanner

3.10.3. Funcţionarea generatorului asincron cu condensator şi conductanţă în paralel 176
3.10.4. Schema de montaj a generatorului asincron 181
3.10.5. Concluzii 182
3.11. Funcţionarea motoarelor asincrone alimentate de convertoare 184
3.12. Funcţionarea motoarelor asincrone în regimuri nesimetrice sau dezechilibrate 189
3.12.1. Întreruperea unei linii a reţelei de alimentare a unui motor trifazat cu înfăşurarea statorică conectată în stea cu nulul izolat . . 192
3.12.2. Întreruperea unei linii a reţelei de alimentare a unui motor trifazat cu înfăşurarea statorică conectată în triunghi 199
3.12.3. Întreruperea unei linii a reţelei de alimentare a unui motor trifazat cu înfăşurarea statorică conectată în stea cu conductor neutru 200
3.12.4. Alimentarea motorului asincron de la o reţea cu un sistem nesimetric de tensiuni 203
3.12.5. Utilizarea motoarelor asincrone trifazate alimentate de la reţele monofazate 204
3.12.6. Scurtcircuitarea fazelor statorului 204
3.12.7. Funcţionarea motorului asincron cu înfăşurarea rotorică dezechilibrată electric 206
3.12.8. Utilizarea coliviei rotorice cu inele de conexiune întrerupte pentru îmbunătăţirea caracteristicilor de pornire 213
3.13. Alegerea unei maşini asincrone în funcţie de condiţiile de exploatare 216
3.14. Punerea în funcţiune a motoarelor electrice 222
3.14.1. Probleme generale 222
3.14.2. Montajul 223
3.14.3. Pregătirea pentru pornirea motorului 224
3.14.4. Probe preliminare pentru punerea în funcţiune 227
3.14.5. Uscarea motoarelor 230
3.14.6. Pornirea 232
3.14.7. Funcţionarea în sarcină 233
3.15. Întreţinerea motorului asincron în timpul exploatării 233
3.15.1. Generalităţi 233
3.15.2. Termenele pentru revizii şi reparaţii 234
3.15.3. Demontarea maşinilor electrice asincrone 236
3.16. Defecte şi regimuri anormale de funcţionare 239
3.16.1. Generalităţi 239
3.16.2. Motorul nu porneşte sau nu intră în turaţia nominală în gol sau în sarcină 240
3.16.3. Motorul se supraîncălzeşte la mersul în gol sau la mersul în sarcină 242
3.16.4. Motorul are un mers zgomotos 245
3.16.5. Periile scînteiază la pornire sau în timpul funcţionării 248
4. Maşina sincronă 250
4.1. Proprietăţile principale ale maşinii sincrone 250
4.1.1. Ecuaţia tensiunii generatorului sincron cu poli înecaţi 250
4.1.2. Ecuaţia tensiunii generatorului sincron cu poli aparenţi 252
4.1.3. Diagrama de fazori a tensiunilor şi curenţilor generatorului sincron cu poli aparenţi (diagrama Blondel) 253
4.1.4. Puterea electromagnetică a generatorului sincron 254
4.1.5. Funcţionarea motorului sincron 255
4.1.6. Ecuaţia tensiunii motorului sincron 257
4.1.7. Diagrama de fazori a tensiunii şi curenţilor motorului sincron . . . 258
4.1.8. Puterea electromagnetică a motorului sincron 259
4.1.9. Pornirea motorului sincron 260
4.2. Determinarea curbei cuplului de pornire în asincron a maşinii sincrone, cunoscînd parametrii electrici 262
4.2.1. Rotorul cu colivie 264
4.2.2. Rotorul cu poli masivi 268
4.2.3. Calculul simplificat al caracteristicilor de pornire 272

Scanned with OKEN Scanner

4.3. Încălzirea mașinii sincrone la pornire 273
4.3.1. Încălzirea mașinii sincrone cu rotor tip colivie la pornire 273
4.3.2. Încălzirea rotorului masiv la pornire 273
4.4. Sistemul de excitație statică a mașinilor sincrone 275
4.4.1. Sistemele generale de excitație ale mașinilor sincrone 275
4.4.2. Generatoare sincrone autoexcitate cu un sistem de redresoare statice 276
4.4.3. Sisteme de excitație cu redresoare rotative cu semiconductoare pentru motoare sincrone 291
4.5. Alegerea mașinii sincrone în funcție de condițiile de exploatare . . . 293
4.5.1. Generalități referitoare la tipurile constructive 293
4.5.2. Alegerea motoarelor sincrone 295
4.6. Punerea în funcțiune a unei mașini sincrone 296
4.6.1. Generalități referitoare la punerea în funcțiune 296
4.6.2. Transportul și depozitarea 300
4.6.3. Montajul 300
4.6.4. Verificarea înainte de punerea în funcțiune 302
4.6.5. Uscarea mașinilor sincrone 308
4.6.6. Pornirea, funcționarea și oprirea generatoarelor sincroane 309
4.6.7. Pornirea, funcționarea și oprirea motoarelor sincrne 311
4.7. Întreținera mașinii sincrone în timpul exploatării 317
4.8. Defecte și regimuri anormale de funcționare 318
4.8.1. Generalități 318
4.8.2. Regimuri anormale și defecte la funcționarea în paralel a generatorului 319
4.8.3. Defecte la pornirea în asincron a motorului sincron 320
4.8.4. Motorul sincron pendulează și iese din sincronism 322

5. Mașina de curent continuu 323
5.1. Alegerea unei mașini de curent continuu în funcție de condițiile de exploatare 323
5.1.1. Generalități 323
5.1.2. Motoare de curent continuu uzuale 324
5.1.3. Motoare uzuale cu utilizări speciale 327
5.1.4. Tendințe noi privind construcția motoarelor de curent continuu 331
5.2. Punerea în funcțiune a mașinilor de curent continuu 335
5.3. Întreținerea unei mașini de curent continuu în timpul exploatări . . . 338
5.3.1. Generalități 338
5.3.2. Întreținerea în timpul exploatării 341
5.4. Defecte și regimuri anormale de funcționare 342
5.4.1. Generalități 342
5.4.2. Scîntei la colector 343
5.4.3. Încălzire exagerată 346
5.4.4. Pornire anormală 347
5.4.5. Turație anormală 348
5.4.6. Posibilități de încărcare reduse 348
5.4.7. Tensiune anormală a generatorului 349
5.4.8. Repartizarea neuniformă a sarcinii și funcționarea instabilă a generatoarelor 351
5.4.9. Autodemagnetizarea și remagnetizarea generatorului 354
5.5. Funcționarea motoarelor de curent continuu alimentate de la un sistem cu tiristoare 356
5.5.1. Variația turației motorului de curent continuu prin modificarea tensiunii la bornele indusului 356
5.5.2. Scheme de redresoare cu tiristoare 356
5.5.3. Realizarea instalației cu tiristoare 358
5.6. Caracteristicile instalațiilor de reglare a turației cu tiristoare 359

Scanned with OKEN Scanner

6. **Măsuri de reducere a zgomotului în exploatarea mașinilor electrice rotative și a transformatoarelor** 361
6.1. Surse de zgomot la mașinile electrice rotative 361
6.2. Surse de zgomot la transformatoarele electrice 361
6.3. Nivelul zgomotului 362
6.4. Metode pentru reducerea zgomotului în exloatare 368
6.4.1. Generalități 368
6.4.2. Reducerea zgomotului în exploatarea mașinilor electrice rotative . 369
6.4.3. Reducerea zgomotului în exploatarea transformatoarelor 381

7. **Limitele de încălzire admisibile ale mașinilor electrice rotative și ale transformatoarelor** 388
7.1. Mașinile electrice rotative 388
7.2. Transformatoare uzuale (în ulei) 392

8. **Influența suprasarcinilor de scurtă durată asupra duratei de serviciu a izolației motoarelor** 394
8.1. Generalități 394
8.2. Expresia duratei de serviciu a izolației 394

9. **Curenții electrici care apar în lagărele mașinilor electrice rotative** . . . 399
9.1. Generalități 399
9.2. Curenții electrici din lagărele mașinii de curent continuu produși de curenții electrici care formează spire închise în jurul arborelui 399
9.3. Curenții elctrici din lagărele mașinilor de curent continuu sau alternativ produși de curenți electrici care formează spire închise în jurul arborelui 405
9.4. Curenții electrici alternativi din lagărele mașinilor de curent alternativ produși de curenți electrici care formează spire închise în jurul arborelui 407
9.5. Curenții electrici induși de un flux alternativ care înlănțuie circuitul arbore-lagăr-batiu 408

Bibliografie 411

Lista standardelor referitoare la mașini electrice și transformatoare de putere 415

Scanned with OKEN Scanner

1. ALEGEREA MAŞINILOR ELECTRICE în funcţie de condiţiile de exploatare

Prin condiţii de exploatare se înţelege o sumă de situaţii în care se poate găsi o maşină electrică în timpul utilizării ei.

Aceste situaţii pot influenţa buna funcţionare a maşinii electrice şi ca urmare, la alegerea unei maşini electrice trebuie să se ţină seama de condiţiile în care aceasta va funcţiona în exploatare.

O maşină electrică bine aleasă din punct de vedere al parametrilor electrici şi mecanici poate fi pusă în situaţii diferite de funcţionare de următorii factori: serviciul de funcţionare, altitudinea locului de montare, temperatura mediului ambiant, natura mediului ambiant, poziţia de funcţionare, solicitările în perioada de pornire, suprasarcini în timpul funcţionării, scopul funcţional.

1.1. SERVICIUL DE FUNCŢIONARE

În publicaţia CEI 34-1 din 1969 şi STAS 1893-65 în curs de revizuire s-a introdus noţiunea de *serviciu tip,* iar vechea noţiune de *regim* al unei maşini electrice a fost precizată corespunzător.

Regimul este precizat prin ansamblul valorilor numerice ale mărimilor electrice şi mecanice care caracterizează funcţionarea unei maşini electrice. Astfel, regimul nominal este acela în care ansamblul valorilor numerice coincide cu valorile nominale ale mărimilor caracteristice. Mersul în gol este regimul caracterizat printr-o putere utilă nulă, celelalte mărimi electrice sau mecanice avînd valori numerice bine precizate.

Serviciul este precizat prin succesiunea şi durata de menţinere a regimurilor (inclusiv mersul în gol sau repausul). Serviciul nominal este pre-

Scanned with OKEN Scanner

cizat prin valorile numerice ale mărimilor electrice şi mecanice, împreună cu timpul lor de menţinere şi cu ordinea lor de succesiune, stabilite de către producător şi notate pe plăcuţa indicatoare. *Serviciul tip* este caracterizat printr-o succesiune normalizată a unor regimuri specifice, iar *serviciul nominal tip* este serviciul nominal în definirea căruia intră unul din serviciile tip, cu specificarea duratei de menţinere a regimurilor sau a unor grupuri de regimuri care intră în compunerea serviciului tip considerat.

Serviciile tip ale maşinilor electrice au fost limitate la opt şi ele sînt strîns legate de regimul termic al maşinii.

Serviciul continuu (S1) corespunde funcţionării maşinii într-un regim constant cu o durată suficientă pentru ca echilibrul termic să fie atins (fig. 1.1).

Pentru serviciul nominal tip S1, durata de menţinere a sarcinii nominale este nelimitată.

Serviciul de scurtă durată (S2) corespunde funcţionării maşinii în regim constant un timp determinat, mai mic decît cel necesar pentru atingerea echilibrului termic, urmat de un repaus cu o durată suficientă pentru ca maşina să atingă starea practic rece (fig. 1.2).

Pentru serviciul nominal tip corespunzător serviciul tip S2, durata de menţinere a sarcinii este 10; 30; 60; 90 minute. Adesea, prin înţelegere între producător şi beneficiar, se pot stabili şi alte durate de menţinere a sarcinii.

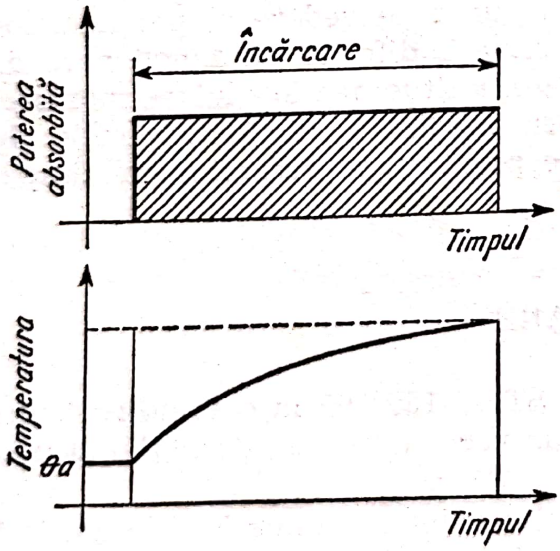


Fig. 1.1. Reprezentarea grafică a serviciului continuu S_1.

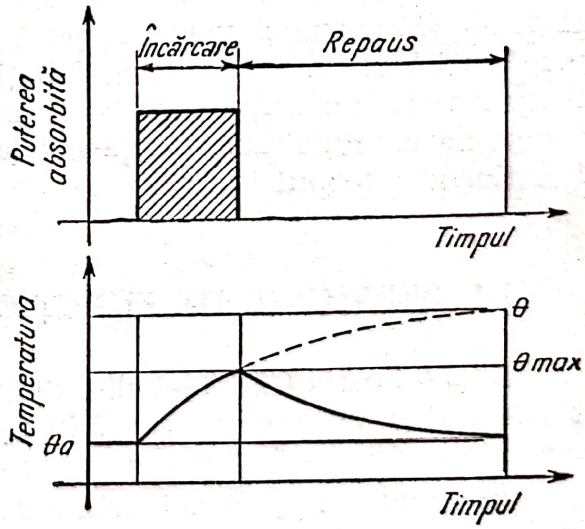


Fig. 1.2. Reprezentarea grafică a serviciului de scurtă durată S_2.

Serviciul intermitent periodic (S3) corespunde funcţionării maşinii într-un serviciu compus dintr-o succesiune de cicluri identice, fiecare conţinînd un timp de funcţionare la un regim constant şi un timp de repaus

Scanned with OKEN Scanner

(fig. 1.3), astfel încît în cursul fiecăruia dintre ele curentul de pornire nu influenţează încălzirea într-un mod deosebit (căldură degajată în înfăşurarea indusului în timpul unei porniri nu depăşeşte 10% din căldura totală degajată de maşină în timpul unui ciclu).

Pentru serviciul nominal tip corespunzător serviciului tip S3, durata ciclului este de 10 minute, dacă nu se dau alte indicaţii iar durata de menţinere a sarcinii este de 15; 25; 40; 60% din durata ciclului. Durata de menţinere a sarcinii raportată la durata ciclului şi exprimată în procente, se mai numeşte şi *durată activă relativă de lucru*, notată cu DA.

Maşinile destinate să funcţioneze în serviciu intermitent se deconectează şi se opresc în timpul pauzei.

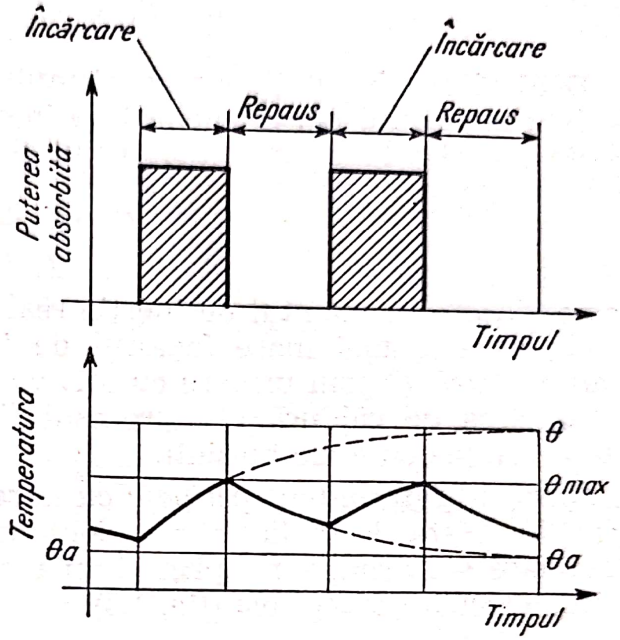


Fig. 1.3. Reprezentarea grafică a serviciului intermitent periodic S_3.

Serviciul intermitent periodic cu durată de pornire (S4) corespunde funcţionării maşinii într-un serviciu compus dintr-o succesiune de cicluri identice, fiecare cuprinzînd un timp apreciabil de pornire, un timp de funcţionare la regim constant şi un timp de repaus (căldura degajată în înfăşurarea indusului în timpul unei porniri depăşeşte 10% din căldura totală degajată de maşină în timpul unui ciclu), fig. 1.4.

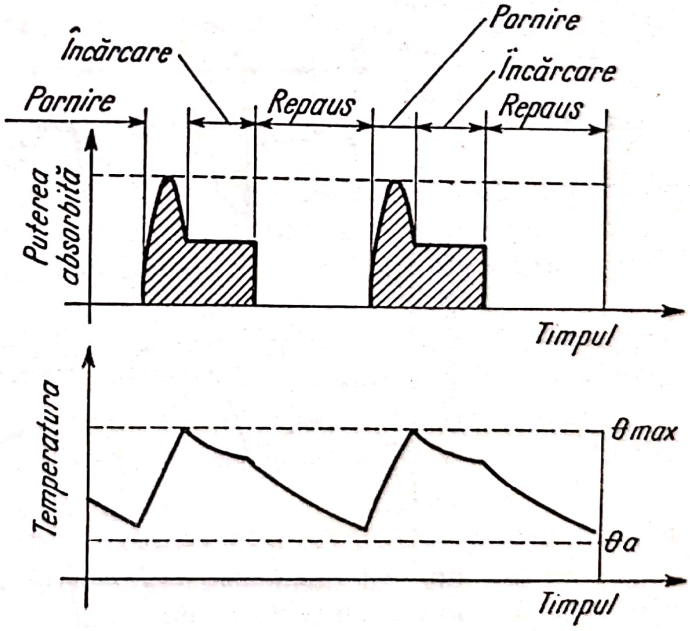


Fig. 1.4. Reprezentarea grafică a serviciului intermitent periodic cu durată de pornire S_4.

Pentru serviciul nominal tip corespunzător serviciului tip S4 durata ciclului este de 10 minute, dacă nu se dau alte indicaţii, iar durata de menţinere a sarcinii este de 15; 25; 40 sau 60% din durata ciclului. Se impune ca la acest serviciu să se indice şi factorul de inerţie F_1, definit ca raportul dintre suma momentelor de inerţie ale părţilor în mişcare de rotaţie ale motorului J_M şi

Scanned with OKEN Scanner

ale mecanismului acționat J_m și momentul de inerție al părții în mișcare de rotație a motorului:

$$F_1 = \frac{J_M + J_m}{J_M}$$

Dacă viteza de rotație a mecanismului acționat nu diferă de viteza de rotație a motorului n_m, momentul de inerție al mecanismului acționat J_m trebuie raportat la arborele motorului și se obține relația

$$J_m = J'_m \frac{n_m^2}{n_M^2}$$

în care J'_m este momentul de inerție real al mecanismului acționat.

Cu cît este mai mare factorul de inerție, cu atît va fi mai lungă fiecare pornire, și prin urmare cu atît va fi mai mare influența exercitată de degajarea de căldură din procesul fiecărei porniri, asupra încălzirii părților componente ale mașinii.

Serviciul intermitent periodic cu durată de pornire și de frînare electrică (S5) diferă de regimul precedent prin aceea că fiecare perioadă de funcționare se termină nu prin simpla deconectare a mașinii, ci și prin frînarea electrică a acesteia (fig. 1.5).

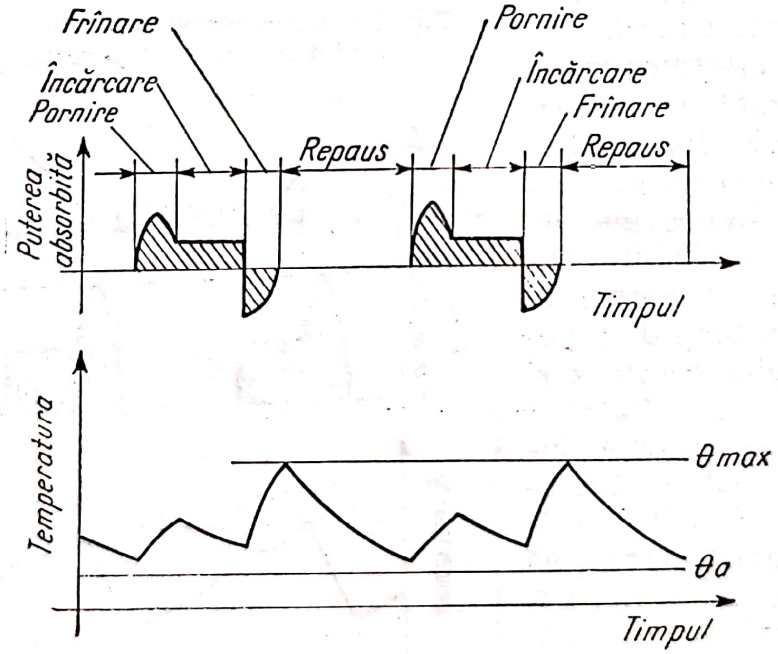


Fig. 1.5. Reprezentarea grafică a serviciului intermitent cu perioade de pornire și frînare electrică S_5.

Independent de modul frînării electrice, aceasta este inevitabil legată de o degajare suplimentară de căldură în mașină, care va fi cu atît mai mare cu cît este mai mare valoarea factorului de inerție.

Valorile duratei relative de funcționare activă DA, ale factorului de inerție F_1 și ale numărului de porniri pe oră pentru acest serviciu sînt aceleași ca și la serviciul intermitent periodic precedent S4 (fără frînare).

Serviciul neîntrerupt cu sarcină intermitentă periodică (S6) corespunde funcționării mașinii într-un serviciu compus dintr-o succesiune de cicluri identice, conținînd cîte un timp de funcționare în regim constant și un timp de funcționare în gol. Nu există repaus, așa cum se vede în fig. 1.6.

Pentru serviciul nominal tip corespunzător serviciului S6, durata ciclului este de 10 minute, dacă nu se dau alte indicații durata de menți-

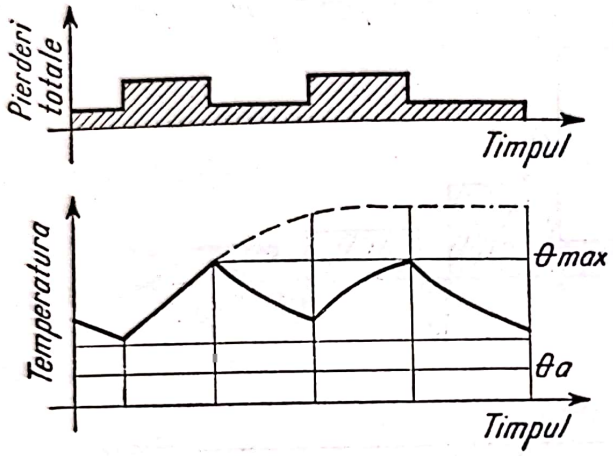


Fig. 1.6. Reprezentarea grafică a serviciului continuu cu sarcină intermitentă periodică S_6.

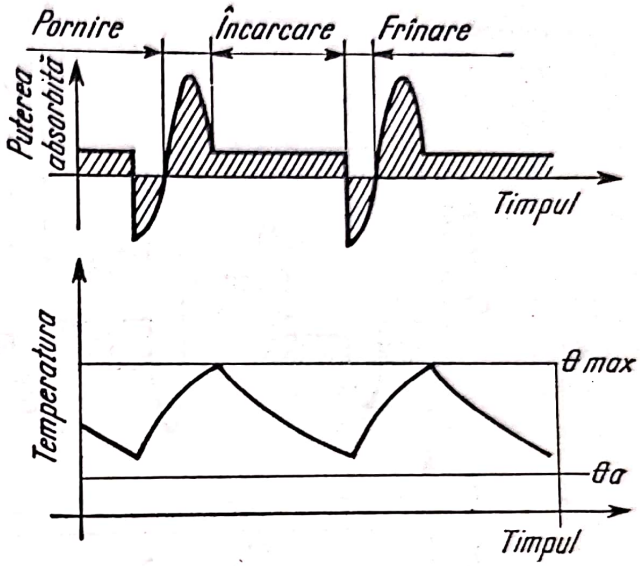


Fig. 1.7. Reprezentarea grafică a serviciului continuu cu durate de pornire și de frînare electrică periodice S_7.

nere a sarcinii este de 15; 25; 40 sau 60% din durata ciclului, iar factorul de inerție are o valoare bine precizată.

În acest serviciu, duratele de menținere a sarcinii și cele de mers în gol nu sînt suficient de lungi pentru ca încălzirea părților mașinii, la o temperatură constantă a mediului de răcire, să poată atinge valori practic stabilizate.

Serviciul neîntrerupt cu durate de pornire și de frînare electrică periodice (S7) corespunde funcționării mașinii într-un serviciu compus dintr-o succesiune de cicluri identice, conținînd cîte un timp de pornire, un timp de funcționare în regim constant și un timp de frînare electrică. Nu există timp de repaus, cum se vede în fig. 1.7.

Pentru serviciul nominal tip corespunzător serviciului S7, durata ciclului este de 10 minute; dacă nu se dau alte indicații, durata de menținere a sarcinii este de 15; 25; 40 sau 60% din durata ciclului, iar factorul de inerție are o valoare precizată.

Duratele de menținere a sarcinii sînt insuficiente pentru atingerea echilibrului termic în cursul unui ciclu. Numărul de cicluri pe oră, cînd se aleg alte durate de menținere a sarcinii, trebuie să aibă una din valorile: 60; 90; 120; 240; 360; 480; 600. Pentru mai mult de 600 cicluri pe oră, este necesară înțelegerea între producător și beneficiar.

Scanned with OKEN Scanner

Serviciul neîntrerupt cu modificare periodică de turație (S8) constă din cicluri ce alternează permanent, fiecare fiind la rîndul său compus din două sau mai multe perioade de funcționare de viteză de rotație diferită și cu sarcini constante diferite, corespunzătoare acestora, așa cum se vede în fig. 1.8.

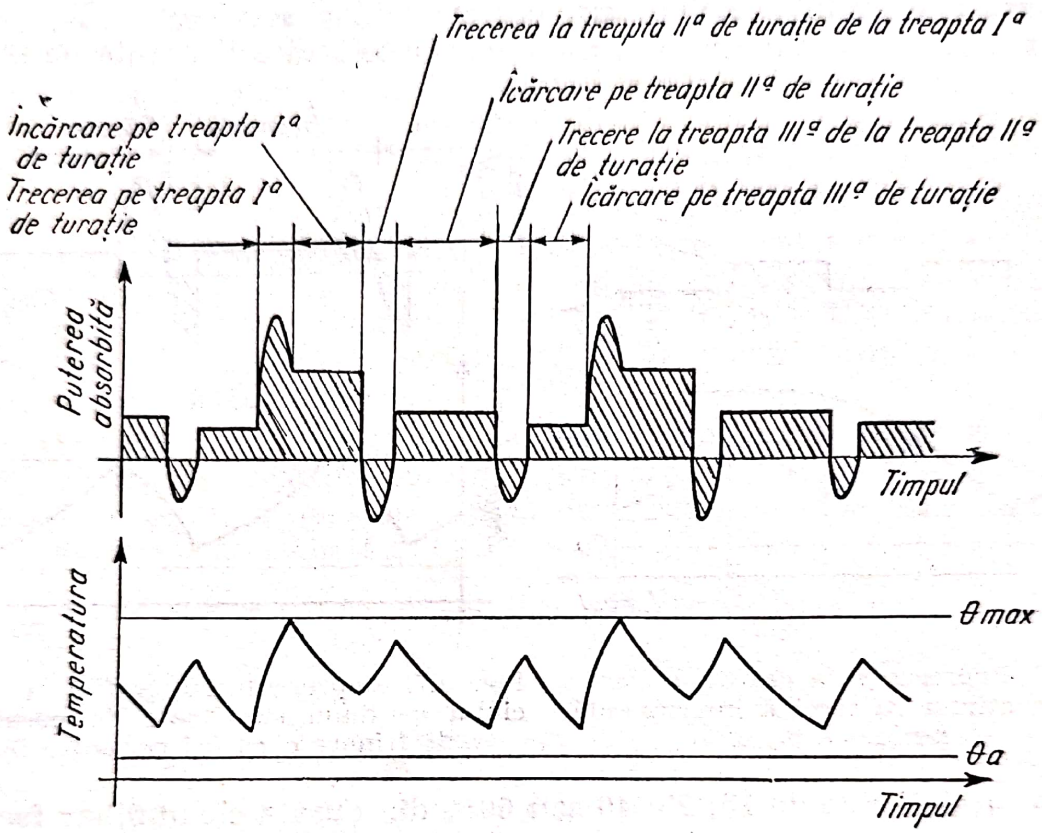


Fig. 1.8. Reprezentarea grafică a serviciului continuu cu modificare periodică de turație S_8.

În acest caz, fiecare trecere de la o viteză de rotație mai mare la una mai mică este însoțită de pierderi prin frînare electrică, iar de la o viteză mai mică la una mai mare — de pierderi prin ambalare, care influențează încălzirea părților componente ale mașinii.

Acest regim de funcționare se caracterizează prin numărul de cicluri complete pe oră (pentru care au fost stabilite valorile normale de 60; 90; 120; 240; 360; 480; 600), prin factorul de inerție și prin durata sarcinii la fiecare dintre vitezele de rotație (care nu este normată și trebuie stabilită prin înțelegere între furnizor și beneficiar).

1.2. ALTITUDINEA LOCULUI DE MONTARE ÎN EXPLOATARE

Altitudinea pentru care se dimensionează mașinile electrice corespunde STAS 1893-72 și este de maximum 1 000 m deasupra nivelului mării.

Scanned with OKEN Scanner

Este necesară această limitare, deoarece pe măsură ce altitudinea crește, presiunea aerului scade și mașina electrică tinde să se încălzească mai mult la aceeași putere nominală (ca urmare a rarefierii aerului), ceea ce determină înrăutățirea condițiilor de răcire. Această creștere a încălzirii (supratemperaturii) mașinii electrice este de aproximativ 0,5°C la 100 m majorare a altitudinii locului de montaj (se consideră aceeași temperatură ambiantă pentru care a fost garantată mașina la 1 000 m altitudine).

Pentru alegerea corespunzătoare a mașinii electrice este deci necesar să se țină seama de altitudine și de temperatura mediului ambiant. STAS-ul 1893-72 reglementează legătura între altitudine și temperatura mediului ambiant pînă la 4 000 m.

1.3. TEMPERATURA MEDIULUI AMBIANT

Toate mașinile electrice normale sînt dimensionate pentru a asigura parametrii nominali la o temperatură a mediului ambiant de maximum +40°C, adică temperatura aerului sau gazului de răcire a mașinii electrice să nu depășească +40°C.

În cazul folosirii apei ca mijloc de răcire, aceasta nu trebuie să depășească +25°C la o mașină normală.

Orice depășire a temperaturii mediului ambiant conduce la realizarea unei mașini speciale sau, în cazul utilizării unei mașini normale, aceasta va trebui aleasă de comun acord cu întreprinderea producătoare respectivă.

Dacă montarea mașinii electrice se face într-un spațiu prea mic sau în condiții în care ventilația mașinii este obturată parțial sau total, deși temperatura mediului ambiant (aer) nu depășește +40°C, se va alege o mașină specială de comun acord cu întreprinderea producătoare. STAS-ul 1893-72 punctul 4.13.1 stabilește dependența limitelor supratemperaturilor admisibile ale mașinilor electrice rotative de temperatura mediului de răcire, dependență de care trebuie să se țină seamă la alegerea mașinii electrice.

1.4. NATURA MEDIULUI AMBIANT ȘI PROTECȚIILE NECESARE

La alegerea mașinilor electrice trebuie să se țină seama și de natura mediului ambiant.

În funcție de condițiile mediului ambiant normal, exploziv, cu vapori de acizi, sau climat special, tipurile constructive de mașini electrice se realizează cu grade de protecție corespunzătoare acestor condiții.

Un prim factor de mediu ambiant este climatul.

La alegerea mașinilor electrice se iau în considerație climatele temperat, tropical umed și tropical arid (uscat).

Scanned with OKEN Scanner

Standardele fixează drept mediu de bază mediul determinat de climatul temperat. Acest mediu se numește mediu tehnic normal.

Pentru mediul tehnic normal, STAS 625-71 stabilește gradele normale de protecție pentru mașini rotative, iar STAS 5680-71 pentru transformatoare.

Pentru alte medii ambiante determinate de prezența gazelor, vaporilor sau pulberilor explozive, de amestecuri din elementele de mai sus între ele sau cu aerul, de vapori corosivi etc., mașinile electrice se construiesc în mod special pe baza unor condiții tehnice speciale înscrise în caiete de sarcini sau standarde.

Astfel, în România prin STAS 6877-68 se stabilesc condiții tehnice pentru construcția și încercarea echipamentelor electrice destinate a funcționa în medii explozive și grizutoase.

Climatul tropical obligă luarea unor măsuri în plus, privind protecția pieselor componente ale mașinilor electrice și înfășurărilor, împotriva coroziunii, acțiunii bacteriilor, termitelor, variației de temperatură și umiditate.

Prin urmare, la alegerea mașinii electrice trebuie să se țină seama în mod special de mediul ambiant în care aceasta va lucra în exploatare.

Gradul de protecție standardizat pentru mediul tehnic normal ține seama și de alte condiții de funcționare și exploatare a mașinilor electrice precizate în cele ce urmează:

1.4.1. **Protecția mecanică** [59]

Mașinile electrice rotative și transformatoarele electrice se construiesc cu diferite tipuri de protecție mecanică, față de intrarea în interiorul lor a corpurilor solide străine și a apei, cum și față de atingerea părților lor active sub tensiune, spre a li se putea asigura o exploatare corespunzătoare locului și scopului pentru care au fost construite.

Notarea unitară a tipurilor de protecție mecanică în România este reglementată prin STAS 5325-70. Protecția este definită de ansamblul măsurilor luate pentru a permite mașinii electrice respective de a funcționa corespunzător în condiții date și pentru a asigura securitatea persoanelor care o deservesc.

Gradele normale de protecție pentru mașini electrice rotative și transformatoare cuprind:

protecția personalului contra atingerii pieselor interioare aflate sub tensiune sau a părților în mișcare din interiorul mașinii și protecția împotriva corpurilor străine solide;

protecția contra pătrunderii apei.

În afară de această protecție mecanică propriu-zisă, mașinile electrice mai pot avea o protecție specială determinată de funcționarea în alte medii decît mediul tehnic normal (de exemplu în mediul exploziv, climat tropical etc.).

Scanned with OKEN Scanner

Protecția unui utilaj electric se indică prin literele IP urmate de încă două cifre pentru cazul mașinilor electrice rotative și al transformatoarelor.

Prima cifră după IP simbolizează protecția contra intrării corpurilor străine solide și a atingerii părților sub tensiune sau mobile din interior și are valori cuprinse între 0 și 6. În tabelul 1.1 sînt redate gradele de protecție standardizate, pentru protecția personalului contra atingerilor pieselor interioare mobile sau sub tensiune și protecția împotriva pătrunderii corpurilor străine solide.

A doua cifră după IP indică protecția împotriva intrării apei și are valori cuprinse între 0 și 8. În tabelul 1.2 sînt redate gradele de protecție contra pătrunderii lichidelor după STAS 5325-70.

În anumite condiții de exploatare protecția unei părți a utilajului electric poate diferi de protecția părții principale. La comandarea utilajului se va indica mai întîi gradul de protecție al părții principale și apoi gradul de protecție al unei anumite părți, cu precizarea organelor la care se referă protecția.

De exemplu, protecția unui motor IP 33 cu borne corespunzătoare gradului de protecție IP 44 se va nota

IP 33 — borne IP 44

ceea ce înseamnă că motorul astfel notat este protejat împotriva atingerii cu unelte sau alte obiecte similare de dimensiuni mici și contra pătrunderii corpurilor străine solide cu diametrul peste 2,5 mm precum și împotriva ploii, căzînd sub formă de stropi din orice direcție, dar sub un unghi de maximum 45° față de verticală.

Acest motor are bornele protejate împotriva pătrunderii corpurilor străine solide cu diametrul peste 1 mm și împotriva stropirii cu lichide proiectate din orice direcție.

Combinînd cele două tipuri de protecție s-ar putea obține un număr foarte mare de protecții diferite, care nu toate au utilitate practică.

Pe acest considerent STAS-ul 5325-70 recomandă numai utilizarea unor anumite grade de protecție pentru mașini electrice rotative și transformatoare (tabelul 1.3).

1.4.2. **Protecția specială**

Mașinile electrice rotative și transformatoarele trebuie să lucreze și în condiții în care se pot aduna în cantități periculoase, din cauza condițiilor locale sau de serviciu, gaze, vapori și pulberi, care amestecate între ele sau cu aerul dau amestecuri deflagrante. Ele pot fi puse și în situația de a funcționa în încăperi cu vapori de acizi, supuse stropirii cu acizi sau alte substanțe chimice, sau în condiții de climă diferită de cea temperată.

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 1.1

Grade de protecţie contra atingerilor

Prima cifră caracteristică	Gradul de protecţie	
	Denumirea	Explicaţii
0	Fără protecţie	— Atingerea părţilor sub tensiune şi a părţilor în mişcare din interior nu este împiedicată. — Pătrunderea corpurilor nu este împiedicată
1	Protejat contra corpurilor solide cu grosimi mai mari de 50 mm	— Atingerea accidentală sau involuntară a părţilor interioare sub tensiune sau în mişcare, cu o suprafaţă mare a corpului omenesc (ex. mîna) nu este posibilă. Atingerea voluntară însă este posibilă. — Pătrunderea corpurilor solide străine cu grosimi pînă la 50 mm este posibilă
2	Protejat contra corpurilor solide cu grosimi mai mari de 12 mm	— Atingerea întîmplătoare sau voită cu degetele a părţilor interioare sub tensiune sau în mişcare este împiedicată[1] — Pătrunderea corpurilor solide străine cu grosimi peste 12 mm este împiedicată
3	Protejat contra corpurilor solide cu grosimi mai mari de 2,5 mm	— Atingerea cu scule, sîrme sau alte obiecte asemănătoare cu grosimi peste 2,5 mm, a părţilor interioare sub tensiune sau în mişcare este împiedicată. — Pătrunderea corpurilor străine solide de grosimi mici (diametre peste 2,5 mm) este împiedicată, cu excepţia trecerilor prevăzute pentru ventilaţie (aspiraţia şi refularea ventilatoarelor exterioare) şi orificiul de golire a apei de condensaţie a maşinilor închise care pot avea gradul 2
4	Protejat contra corpurilor solide cu grosimi mai mari de 1 mm	— Atingerea cu scule, sîrme sau alte obiecte asemănătoare cu grosimi peste 1 mm a părţilor interioare sub tensiune sau în mişcare este împiedicată. — Pătrunderea corpurilor străine solide de grosimi mici (diametre peste 1 mm) este împiedicată, cu excepţia trecerilor prevăzute pentru ventilaţie (aspiraţia şi refularea ventilatoarelor exterioare) şi orificiul de golire a apei de condensaţie a maşinilor închise, care pot avea gradul 2
5	Protejat parţial contra prafului	— Atingerea în orice fel a părţilor interioare sub tensiune sau în mişcare este total împiedicată. — Pătrunderea prafului nu este complet împiedicată, el putînd pătrunde numai în măsura în care nu împiedică bună funcţionare a utilajului
6	Protejat total contra prafului	— Atingerea în orice fel a părţilor interioare sub tensiune sau în mişcare este total împiedicată — Pătrunderea prafului este complet împiedicată

[1] În cazul maşinilor răcite prin ventilator exterior învelişului, protecţia ventilatorului trebuie să fie astfel făcută ca să nu se poată atinge aripile ventilatorului, cu degetul de control, normalizat. Totuşi, pe partea de refulare, degetul poate fi introdus, dar numai pînă la inelul de gardă, cu diametrul de 50 mm.

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 1.2

Grade de protecţie contra pătrunderii apei

A doua cifră caracteristică	Gradul de protecţie	
	Denumirea	Explicaţii
0	Fără protecţie	— Pătrunderea lichidelor nu este împiedicată
1	Protejat contra picăturilor de apă de condensaţie	— Picăturile de condensaţie căzînd vertical trebuie să nu fie dăunătoare
2	Protejat contra picăturilor de apă ce cad sub un unghi de max. 15° faţă de verticală	— Acţiunea dăunătoare a picăturilor de apă căzînd sub un unghi de max. 15° faţă de verticală, este împiedicată
3	Protejat contra apei sub formă de ploaie	— Acţiunea dăunătoare a picăturilor de apă căzînd sub un unghi de max. 60° faţă de verticală este împiedicată
4	Protejat contra stropirii cu apă	— Acţiunea dăunătoare a stropirii cu apă proiectată din orice direcţie asupra utilajului este împiedicată
5	Protejat contra jeturilor de apă sub presiune	— Acţiunea dăunătoare a apei proiectată cu un furtun, în anumite condiţii, asupra utilajului, din toate direcţiile, este împiedicată
6	Protejat împotriva condiţiilor de pe puntea navelor	— Apa provenită din valurile ce izbesc utilajul de pe puntea navelor trebuie să nu pătrundă în carcasă în cantitate dăunătoare
7	Protejat contra efectelor imersiei în apă	— Pătrunderea apei în cantitate dăunătoare în interiorul utilajului total imersat la o presiune dată şi un timp anumit, trebuie să nu fie posibilă
8	Utilaj submersibil	— Pătrunderea apei în cantitate dăunătoare în interiorul utilajului total imersat în apă, la o presiune dată şi un timp nelimitat, trebuie să nu fie posibilă

Observaţie. — Utilajele electrice care după construcţia lor şi după izolaţia folosită sînt destinate a funcţiona în apă şi la care apa pătrunde normal în interior în timpul funcţionării, se consideră din punct de vedere al protecţiei, egale cu gradul de protecţie 8.

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 1.3

Grade normale de protecţie contra atingerii şi pătrunderii corpurilor străine şi a apei (STAS 5325-70)

Prima cifră caracteristică	A doua cifră caracteristică								
	0	1	2	3	4	5	6		8
	Simbolul gradului de protecţie								
0	IP 00	—	—	—	—	—	—	—	—
1	IP 10	IP 11	IP 12	—	—	—	—	—	—
2	IP 20	IP 21	IP 22	IP 23	—	—	—	—	—
3	IP 30	IP 31	IP 32	IP 33	IP 34	—	—	—	—
4	IP 40	IP 41	IP 42	IP 43	IP 44	—	—	—	—
5	IP 50	—	—	—	IP 54	IP 55	IP 56	—	—
6	IP 60	—	—	—	—	IP 65	IP 66	IP 67	IP 68

Observaţii:

— La aparataj se aplică şi o a treia cifră caracteristică pentru protecţia mecanică.
— Tabele similare cu cel de mai sus însă pe grupe de produse se găsesc în următoarele standarde de stat:
STAS 625-71 Maşini electrice rotative. Grade normale de protecţie
STAS 5680-71 Transformatoare electrice. Grade normale de protecţie
STAS 5625-71 Aparate electrice de conectare, reglare şi protecţie şi aparataj de instalaţie. Grade normale de protecţie

Pentru a satisface aceste condiţii maşinile şi transformatoarele se construiesc avînd protecţii speciale.

Echipamentele electrice care deservesc maşinile electrice rotative şi transformatoarele care funcţionează în mediu exploziv (întreruptoare, comutatoare, siguranţe fuzibile, separatoare prize şi fişe, rezistenţe, reostate de pornire, aparate de măsurat şi altele) se vor alege cu gradul de protecţie la nivelul maşinilor electrice şi transformatoarelor pe care le deservesc.

Cu alte cuvinte, echipamentele electrice dintre care şi maşinile electrice şi transformatoarele care funcţionează în locuri unde există pericol să se formeze cu atmosfera amestecuri de gaze sau vapori inflamabili, trebuie să aibă protecţie antiexplozivă, iar în exploatări miniere grizutoase protecţie antigrizutoasă.

După felul protecţiei speciale maşinile electrice se clasifică în:
— maşini electrice cu protecţie antiexplozivă;
— maşini electrice cu protecţie antigrizutoasă.

Scanned with OKEN Scanner

După modul de realizare a protecției, mașinile electrice rotative antiexplozive și antigrizutoase se clasifică în:

— cu carcasă antideflagrantă;
— cu siguranță mărită;
— cu ventilație forțată;
— cu suprapresiune forțată;
— cu protecție specială (mașini imersate sau mașini cu înfășurările înglobate în întregime în rășini speciale).

Mașinile electrice antiexplozive și antigrizutoase pentru orice mod de protecție, trebuie să aibă gradul de protecție normal cel puțin IP 23 pentru protecția antiexplozivă și IP 44 pentru protecția antigrizutoasă.

Această condiție nu este obligatorie la protecția antiexplozivă pentru mașinile electrice cu puterea nominală peste 150 kW dacă acestea sînt montate în încăperi supravegheate.

Transformatoarele de putere antiexplozive și antigrizutoase se execută în următoarele moduri de protecție:

— cu carcasă antideflagrantă;
— cu siguranță mărită;
— cu ulei (numai pentru protecția antiexplozivă);
— cu ventilație forțată;
— cu suprapresiune statică;
— în nisip de cuarț.

Gradul de protecție normală a transformatoarelor cu protecție antiexplozivă și antigrizutoasă trebuie să fie cel puțin IP 54.

În cele ce urmează se vor defini unele moduri de protecție.

Protecția în carcasă antideflagrantă se realizează prin închiderea părților care pot provoca aprinderea amestecurilor explozive într-o carcasă ce poate suporta, fără deteriorare, presiunea exploziei din interior și împiedică transmiterea exploziei mediului ambiant exploziv.

Protecția cu siguranță mărită se realizează prin construirea și dimensionarea elementelor electrice în așa fel încît în exploatare normală să fie exclusă formarea de scîntei, arcuri electrice sau temperaturi periculoase.

Protecția cu ulei se realizează prin scufundarea în ulei a părților ce pot provoca aprinderea amestecurilor explozive la o adîncime la care arcul electric, scînteile, piesele calde sau gazele calde aflate sub ulei nu pot provoca aprinderea amestecurilor explozive aflate deasupra nivelului uleiului.

Protecția cu ventilație se realizează prin izolarea de mediul exploziv a părților mașinilor electrice care ar putea produce aprinderea amestecului exploziv.

Izolarea acestor părți se face într-o carcasă în care se menține, cu suprapresiune, aer curat sau un gaz inert.

Protecția cu ventilație se realizează fie prin ventilație forțată permanentă în circuit deschis, la care mediul gazos (aer curat sau gaz inert) se asigură și se menține prin ventilație continuă, fie prin ventilație cu suprapresiune statică permanentă la care mediul gazos nepericulos și carcasa închisă se asigură înainte de pornire prin ventilație forțată în circuit

Scanned with OKEN Scanner

deschis şi apoi se menţine permanent în cursul exploatării acestui mediu, cu suprapresiune statică.

La alegerea maşinii electrice antiexplozive sau antigrizutoase se ţine seama de natura fluidelor care pot provoca amestecuri explozive.

Amestecurile explozive de gaze sau vapori sînt clasificate prin STAS 6877-68 în patru clase de explozie numerotate cu I, II, III, IV şi cinci grupe de aprindere notate cu G1, G2, G3, G4, G5 (tabelul 1.4).

Tabelul 1.4

Simbolizarea claselor de explozie şi a grupelor de aprindere (STAS 6877-68)

Simbolul clasei de explozie	Simbolul grupei de aprindere				
	G1	G2	G3	G4	G5
I	Metan	—	—	—	—
II	Acetonă Etan Acetat de etil Amoniac Benzen (pur) Acid acetic Oxid de carbon Metanol Propan; Toluen	Alcool etilic i-Acetat de amil n-Butan n-Alcool butilic (Butanol)	Benzină Ţiţei*) n-Hexan	Aldehidă acetică Eter etilic	—
III	Gaz aerian Etilenă	—	Ţiţei*)	—	—
IVa	Gaz de apă Hidrogen	—	—	—	—
IVb	—	—	—	—	Sulfură de carbon
IVc	—	Acetilenă	—	—	—
IVn	Toate gazele clasei de explozie IV				

*) În funcţie de compoziţie.

Clasa de explozie este definită prin capacitatea amestecului exploziv de a se transmite prin spintecături practicate în pereţii de metal, iar grupa de aprindere este definită de temperatura de aprindere a fluidului (a gazului sau a amestecului de gaze etc.).

În tabelul 1.5. sînt date simbolurile protecţiilor antiexplozive şi antigrizutoase precum şi ale clasei de explozie şi grupei de aprindere, inclusiv valorile mărimilor care le definesc.

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 1.5

Simbolizarea protecţiei antigrizutoase şi antiexplozive

Specificarea			Modul de protecţie	Clasa de explozie	Grupe de aprindere
Simbol general Pentru protecţia: Antigrizutoasă **A** Antiexplozivă **Ex**					
Simbol pentru modul de protecţie	cu protecţie în carcasă antideflagrantă		*a*		
	cu protecţie cu siguranţă mărită		*s*		
	cu protecţie în ulei		*u*		
	cu protecţie cu ventilaţie forţată		*v*		
	cu protecţie cu suprapresiune statică		*vp*		
	cu protecţie în nisip de cuarţ fără ecran		*n*		
	cu protecţie în nisip de cuarţ cu ecran		*ne*		
	cu protecţie cu siguranţă intrinsecă		*i*		
	cu protecţie specială		*x*		
Simbolul clasei de explozie	Lărgimea critică a interstiţiului pentru lungimea minimă de 25 mm, determinată conform pct. 4.1.1.4.	peste 1,00 mm		I şi A	
		peste 0,6 mm pînă la 1,00 mm		II	
		peste 0,38 mm pînă la 0,6 mm		III	
		0,38 mm sau mai mic		IV a	
				IV b	
				IV c IV n	
Simbolul grupei de aprindere	Temperatura de aprindere °C	peste 450			G 1
		peste 300 la 450			G 2
		peste 200 la 300			G 3
		peste 135 la 200			G 4
		de la 100 la 135			G 5
Exemplu de notare	protecţie antigrizutoasă cu siguranţă mărită **A**		*s*	—	—
	cu protecţie în carcasă antideflagrantă pentru benzină **Ex**		*a*	II	G 3
	cu protecţie în ulei, pentru gaz de iluminat **Ex**		*u*	III	G 1

Scanned with OKEN Scanner

Este important de reţinut că interstiţiul (lăţimea maximă a spintecăturii) admisibil pentru lungimea minimă de 25 mm este 1 mm în cazul clasei de explozie I şi protecţiei antigrizutoase pentru a evita transmisia exploziei în mediul ambiant. Trebuie de asemenea reţinut că încălzirea părţilor maşinilor electrice trebuie să fie inferioară temperaturii de aprindere a fluidelor. Grupa G5 de aprindere are temperatura de aprindere cea mai mică (între 100—135°C).

În tabelul 1.6 sînt date temperaturile limită şi încălzirile (supratemperaturile) admisibile pentru orice parte a maşinilor electrice în contact cu mediul ambiant inflamabil.

Tabelul 1.6

Temperaturile minime şi încălzirile admisibile pentru grupele de aprindere

Protecţia echipamentului electric		Temperatura limită °C	Supratemperatura[1] °C
Antigrizutoasă		200	160
Antiexplozive pentru grupele de aprindere:	G1	360	320
	G2	240	200
	G3	160	120
	G4	110	70
	G5	80	40

[1]) Valorile din tabel sînt date pentru temperatura mediului ambiant de +40°C; la temperatura mediului ambiant mai mare de 40°C, valoarea încălzirii limită trebuie redusă cu atît cu cît temperatura ambiantă depăşeşte 40°C.

Exemplu. Alegerea unui motor de 1,1 kW, 1 500 rot/min, 220/380 V, care funcţionează în medii ambiante explozive necesar acţionării unui ventilator ce funcţionează într-o încăpere cu vapori de alcool etilic.

Motorul ce se va alege va fi antiexploziv pentru clasa de explozie II şi grupa de aprindere G2 (tabelul 1.4.).

Notaţia pentru comandă va fi:

— Motor electric asincron 1,1 kW, 1 500 rot/min, 220/380 V, execuţie II G2 (s-a ales un motor cu protecţie în carcasă antideflagrantă).

Scanned with OKEN Scanner

1.5. POZIȚIA DE FUNCȚIONARE

Poziția de funcționare în exploatare precum și modul de fixare pe postamente sau pe agregatele pe care mașinile le deservesc, trebuie avută în vedere la alegerea mașinilor electrice din punct de vedere constructiv pentru a le pune în situația de funcționare normală și fără defecțiune.

Întrucît poziția de funcționare este o condiție de alegere care se referă mai mult la mașinile rotative, se va reveni ulterior asupra acestei probleme la capitolul 3.

1.6. CUPLURILE REZISTENTE ÎN PERIOADA DE PORNIRE A AGREGATELOR CARE TREBUIE DESERVITE DE MAȘINILE ELECTRICE

Dacă aceste cupluri rezistente depășesc prevederile din STAS 1764-70 și STAS 1893-72 în ce privește cuplul de pornire inițial și cuplul minim în perioada de pornire la o mașină corespunzătoare scopului din punct de vedere al puterii nominale, atunci de comun acord cu producătorul trebuie aleasă mașina cea mai adecvată din seria care se produce curent sau se va construi o mașină electrică specială.

1.7. SUPRASARCINI CARE POT APĂREA ÎN TIMPUL FUNCȚIONĂRII MAȘINILOR ELECTRICE

Asemenea suprasarcini sînt: șocurile de curent, scurtcircuitele, scurtcircuitul brusc, supratensiunile etc.

Suprasarcinile admisibile pentru mașinile electrice rotative și transformatoare de putere normale sînt reglementate de STAS 1893-72 și STAS 1703-67.

Dacă în exploatare apar suprasarcini mai mari decît cele admise, trebuie construite mașini electrice speciale care să răspundă și la suprasarcini mai mari.

1.8. SCOPUL FUNCȚIONAL

Scopul funcțional constituie criteriul primordial care stă la baza alegerii unei mașini electrice rotative sau a unui transformator. Scopul funcțional definește tipul funcțional al mașinii electrice rotative sau al transformatorului de ales, pentru a corespunde condițiilor de exploatare.

Scanned with OKEN Scanner

În România tipurile funcționale de mașini electrice rotative și transformatoare sînt stabilite prin STAS 4861/1-73, după cum urmează:

— mașini de curent alternativ uzuale;
— mașini de curent continuu uzuale;
— mașini de curent alternativ speciale;
— mașini de curent continuu speciale;
— convertizoare;
— transformatoare.

Scanned with OKEN Scanner

2. TRANSFORMATORUL

2.1. DETERMINAREA PARAMETRILOR ELECTRICI AI TRANSFORMATOARELOR TRIFAZATE UTILIZÎND DATELE DIN CATALOG

Datele din catalog necesare determinării parametrilor electrici ai transformatoarelor trifazate sînt următoarele: tensiunea nominală primară de linie U_1; tensiunea secundară nominală de linie U_2 (la funcționarea în gol a transformatorului); tensiunea de scurtcircuit u_k, exprimată în procente din tensiunea nominală, care aplicată pe o parte a transformatorului, cealaltă fiind în scurtcircuit, face ca prin înfășurările de fază să circule curenții nominali (toate în valori eficace); pierderile de scurtcircuit P_k (determinate la încercarea precizată mai sus); curentul de funcționare în gol i_0, exprimat în procente din curentul nominal; pierderile în gol P_0 (determinate printr-o încercare de funcționare în gol la tensiunea nominală de alimentare); conexiunile primare și secundare (stea, triunghi, zig-zag etc.).

Prin parametri electrici ai transformatorului se înțeleg: rezistența primară R_1; reactanța de scăpări primară $X\sigma_1$; rezistența secundară raportată la primar R_2' (înmulțită cu pătratul raportului numerelor de spire primare w_1 respectiv secundare w_2); reactanța de scăpări secundară raportată la primar $X'\sigma_2$; rezistența R_m și reactanța X_m corespunzătoare circuitului de magnetizare (determinate de pierderile și de fluxul magnetic din oțelul miezului). Toți acești parametri intervin în schema echivalentă din fig. 2.1.

Cu o bună aproximație, între tensiunea nominală de fază a primarului U_{1n} și tensiunea secundară de funcționare în gol U_{20} de fază există relația

$$\frac{U_{1n}}{U_{20}} \approx \frac{w_1}{w_2},$$

Scanned with OKEN Scanner

iar între curenții nominali prin înfășurările de fază

$$\frac{I_{1n}}{I_{2n}} \approx \frac{w_2}{w_1}.$$

În consecință, pierderile la scurtcircuit se pot exprima prin relația

$$P_k = 3(R_1 I_{1n}^2 + R_2 I_{2n}^2) = 3\left(R_1 + R_2 \frac{w_1^2}{w_2^2}\right) I_{1n}^2 = 3(R_1 + R_2')\, I_{1n}^2 = 3R_k I_{1n}^2,$$

în care $R_k = R_1 + R_2'$ se numește rezistență globală a transformatorului (sau rezistență Kapp). Din relația precedentă rezultă

$$R_k = R_1 + R_2' = \frac{P_k}{3 I_{1n}^2}.$$

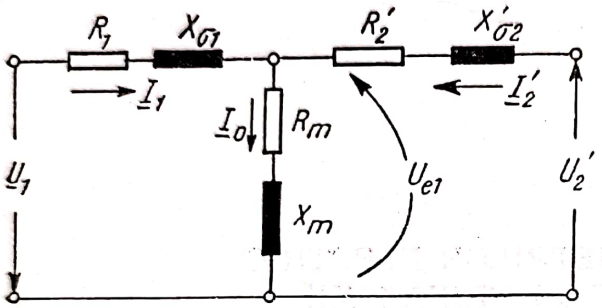


Fig. 2.1. Schema echivalentă a transformatorului.

Cu suficientă aproximație, se poate considera că $R_1 \approx R_2'$ și deci

$$R_1 \approx R_2' \approx \frac{P_k}{\quad},$$

obținîndu-se astfel rezistențele din ramurile longitudinale ale schemei echivalente din fig. 2.1.

În mod analog rezistenței, se definește o reactanță globală de scăpări

$$x_{\sigma k} = x_{1} + x_{\sigma 2},$$

pe baza căreia se poate scrie expresia impedanței globale

$$Z_k^2 = R_k^2 + X_{\sigma k}^2 = (R_1 + R_2')^2 + (X_{\sigma 1} + X_{\sigma 2}')^2,$$

care intră în definiția tensiunii de scurtcircuit procentuale

$$u_k = \frac{Z_k I_{1n}}{U_{1n}} \cdot 100\ [\%].$$

Cunoscînd din datele de catalog u_k și U_{1n} se obține

$$Z_k = \frac{u_k U_{1n}}{100 I_{1n}},$$

din care apoi se deduce

$$X_{\sigma k} = X_{\sigma 1} + X_{\sigma 2} = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}.$$

Cu bună aproximație, se ia

$$X_{\sigma 1} \approx X_{\sigma 2}' \approx \frac{X_{\sigma k}}{2} = \frac{1}{2}\sqrt{Z_k^2 - R_k^2}.$$

Pierderile în oțel rezultă din pierderile la funcționarea în gol

$$P_{Fe}=P_0-3R_1I_0^2\approx P_0,$$

unde

$$I_0=\frac{i_0}{100}I_{1n}.$$

Impedanța de fază la borne, la funcționarea în gol, este

$$Z_0=\frac{U_{1n}}{I_0}\ ;\ R_0=\frac{P_{Fe}}{3I_0^2}\ ;\ X_0=\sqrt{Z_0^2-R_0^2},$$

unde U_{1n}, I_0, Z_0 reprezintă mărimi de fază.

Rezultă parametrii circuitului de magnetizare din fig. 2.1:

$$R_m=R_0-R_1;$$

$$X_m=X_0-X_{\sigma 1}\approx X_0.$$

Odată determinați parametrii schemei echivalente, se pot imagina diferite sarcini și se poate rezolva circuitul electric din figura 2.1, obținându-se curenții, tensiunea secundară, factorii de putere primar și secundar, puterile activă și reactivă absorbite.

2.2. CONEXIUNILE TRANSFORMATOARELOR TRIFAZATE

2.2.1. Tipurile de conexiuni

Conform STAS 1703-67, bornele înfășurărilor transformatoarelor se notează astfel cum este indicat în fig. 2.2 pentru transformatorul monofazat și în fig. 2.3 pentru cel trifazat.

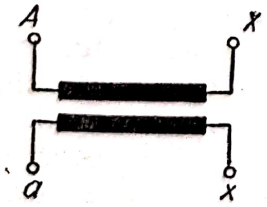


Fig. 2.2. Notarea bornelor la transformatorul monofazat.

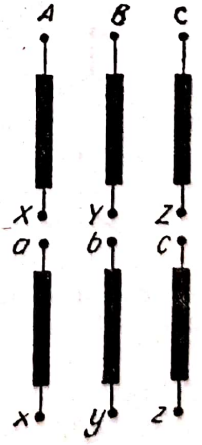


Fig. 2.3. Notarea bornelor la transformatorul trifazat.

Începutul şi sfîrşitul înfăşurării de înaltă tensiune se notează cu literele A, respectiv X. Pentru înfăşurarea de joasă tensiune se utilizează literele mici: a pentru început şi x pentru sfîrşit. Reţeaua trifazată de înaltă tensiune se leagă totdeauna la bornele A, B, C, iar reţeaua de joasă tensiune la bornele a, b, c. Borna neutră se notează cu litera mare N pentru înfăşurarea de înaltă tensiune, respectiv cu litera mică n pentru înfăşurarea de joasă tensiune.

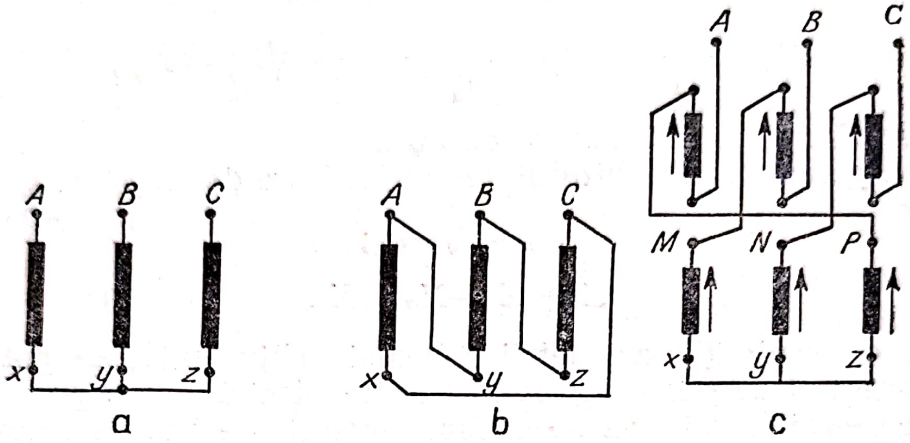


Fig. 2.4. Conexiunile înfăşurărilor:
a — stea; *b* — triunghi; *c* — zigzag.

Cunoscînd notaţia bornelor înfăşurărilor, putem conecta în mod corect înfăşurările transformatorului trifazat în stea, triunghi sau zigzag. Acest lucru este deosebit de important pentru funcţionarea în paralel a mai multor transformatoare. Conexiunea stea a înfăşurărilor este arătată în figura 2.4, *a*, cea triunghi în figura 2.4, *b*, iar cea zig-zag în fig. 2.4, *c*.

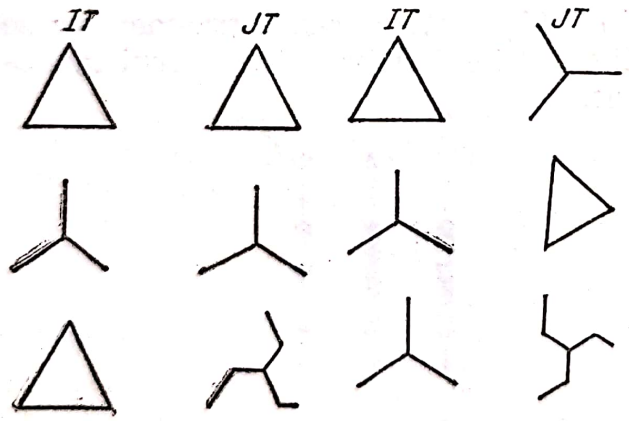


Fig. 2.5. Clasele de conexiuni ale transformatorului trifazat.

Primele două conexiuni se întîlnesc atît la motoare, cît şi la transformatoare. Cea de a treia constituie o conexiune pe care o întîlnim numai la transformatoare.

Conexiunile stea, triunghi şi zigzag se reprezintă prin simbolurile Y, D şi respectiv Z. Conexiunea înfăşurării de înaltă tensiune se simbolizează cu literă mare, iar cea corespunzătoare tensiunii joase cu literă mică. Dacă o înfăşurare are punctul de nul scos, la simbolul corespunzător se adaugă indicele 0. Astfel, expresia Y_0d reprezintă un transformator la care înfăşurarea de înaltă tensiune este conectată în stea şi are punctul de nul scos, iar înfăşurarea de tensiune joasă este legată în triunghi.

Toate combinaţiile posibile de conexiuni sînt în număr de şase şi sînt reprezentate în fig. 2.5. Dar dacă se schimbă între ele două cîte două

Scanned with OKEN Scanner

capetele fiecărei faze, fie în primar fie în secundar, ceea ce echivalează cu a bobina în sens invers în secundar decît în primar, atunci inversîndu-se prin aceasta sensul fazelor într-una din înfășurări, se obține o altă clasă de legături; se zice că aceasta este răsturnata celeilalte. Rezultă deci 12 clase de legături, așa cum se arată în tabelul 2.10, pag. 49. În prima coloană sînt arătate diferitele moduri de notație.

În construcția diagramelor de fazori din tabelul 2.10, tensiunile compuse ale înfășurărilor sînt arătate în toate cazurile prin triunghiuri echilaterale ABC, în care A, B, C se succed în sensul pozitiv (sensul acelor ceasornicului), iar A se găsește în colțul stîng de jos. Atunci poziția bornelor a, b, c rezultă imediat. Dacă înfășurarea este conectată în triunghi, laturile triunghiului ABC, care reprezintă tensiunile compuse, reprezintă în același timp și tensiunile de fază ale înfășurării. Dacă înfășurarea este în stea, între tensiunile de fază și cele compuse există un defazaj de 30°. Unghiul de 30° este luat ca unitate și în conformitate cu acesta s-a elaborat o metodă de notare a grupelor de conexiuni ale înfășurărilor transformatoarelor.

Indicarea pe plăcuța transformatorului a grupei de conexiuni căreia îi aparține transformatorul este foarte importantă, deoarece prin aceasta este determinat unghiul de defazaj dintre tensiunile compuse omoloage, deci dintre tensiunile la borne în înaltă și joasă tensiune. Acest unghi depinde de: sensul de bobinare; felul de notare a bornelor înfășurărilor; felul de conectare a înfășurărilor transformatoarelor trifazate.

Se va arăta influența primilor doi factori, considerînd un transformator monofazat. Înfășurarea superioară a transformatorului reprezentat în fig. 2.6 este primarul (înalta tensiune), iar cea de jos este secundarul (joasa tensiune). Se presupune că ambele înfășurări sînt bobinate în același sens și că bornele lor de sus sînt începuturile (notate cu literele A și a), iar cele de jos (X și x) sînt capetele lor terminale.

Deoarece ambele înfășurări ale transformatorului sînt așezate pe aceeași coloană și străbătute de același flux magnetic, t.e.m. induse în ele au în orice moment același sens față de bornele înfășurărilor (de exemplu de la A spre X în înfășurarea de înaltă tensiune și de la a spre x în cea de joasă tensiune). T.e.m. și $\underline{U}_{e1}$ *și* $\underline{U}'_{e2}$ (adică $\underline{U}_{e2}$ raportat la primar) sînt în fază și se reprezintă prin doi fazori egali ca valoare, de aceeași direcție și de același sens (fig. 2.6, *b*). Aceeași situație o regăsim dacă ne referim la tensiunile primară, respectiv secundară, considerate între borne omoloage (neglijîndu-se căderile de tensiune în rezistențele și reactanțele de scăpări ale înfășurărilor).

Dacă înfășurările primară și secundară sînt bobinate în sensuri diferite, dar notarea bornelor rămîne aceeași ca în figura 2.6, *a*, după cum se poate vedea în figura 2.7, *a*, t.e.m. $\underline{U}_{e1}$ și $\underline{U}'_{e2}$ față de bornele înfășurărilor primare și secundare sînt în opoziție de fază, adică sînt îndreptate în sensuri diferite (de exemplu, de la A spre X în înfășurarea primară și de la x spre a în înfășurarea secundară). În conformitate cu acest fapt, t.e.m. $\underline{U}_{e1}$ și $\underline{U}'_{e2}$ se reprezintă prin fazori îndreptați în sensuri diferite (fig. 2.7, *b*).

S-ar fi obținut același rezultat dacă se păstra același sens de bobi-

Scanned with OKEN Scanner

nare ca și în figura 2.6, *a* și dacă s-ar fi schimbat notarea bornelor înfășurării secundare (literele din paranteze în figura 2.6, *a*). În acest caz, $\underline{U}_{e1}$ ar fi avut un sens (de exemplu de la borna *A* spre borna *X*), iar $\underline{U}'_{e2}$ alt sens (de la borna *x* spre borna *a*).

Astfel, considerăm fazorul t.e.m. primare $\underline{U}_{e1}$ ca dat; se poate spune că t.e.m. secundară $\underline{U}'_{e2}$ a transformatorului monofazat coincide cu $\underline{U}_{e1}$

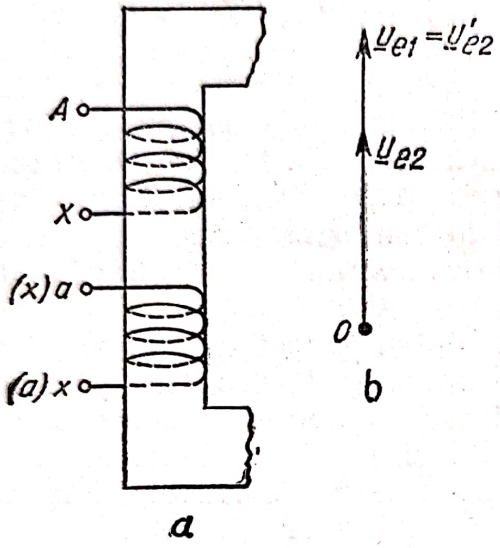


Fig. 2.6. Defazajul t.e.m. induse în raport cu sensul înfășurării și modul de notare a bornelor.

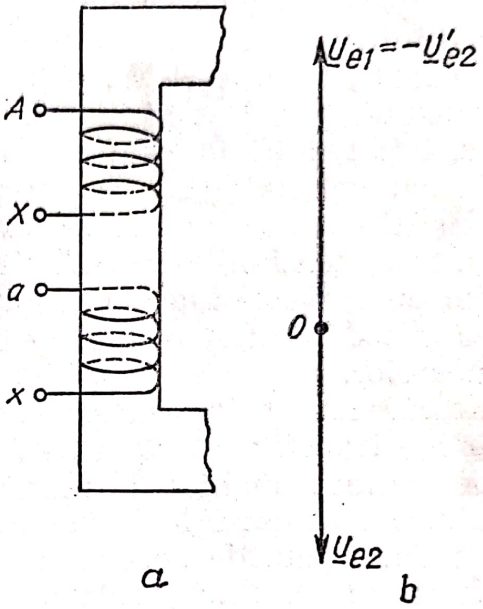


Fig. 2.7. Defazajul t.e.m. induse, la sensuri inverse de bobinare a înfășurărilor.

ca fază sau se află în opoziție de fază; în primul caz, fazorul $\underline{U}'_{e2}$ este defazat față de fazorul $\underline{U}_{e1}$ cu unghiul $\alpha=0°$, iar în al doilea caz cu unghiul $\alpha=180°$.

În loc de a exprima unghiul de defazaj dintre tensiunile la borne omoloage primară și secundară în grade, se va lua ca unitate de defazaj unghiul de 30° pe care îl fac între ele semnele celor 12 ore pe cadranul unui ceasornic. Grupa transformatorului se va determina în primul caz prin cifra 12, fiindcă $12 \cdot 30° = 360°$ (în locul cifrei zero care nu există pe cadranul ceasornicului).

Aplicînd aceeași metodă de notație numerică la transformatorul trifazat, se va face mai întîi ipoteza că ambele înfășurări de înaltă și joasă tensiune au același sens de bobinare și aceeași succesiune a bornelor *A*, *B*, *C*, și *a*, *b*, *c*, începînd cu *A* la stînga jos.

Se va analiza întîi cazul conexiunii Yy (fig. 2.8, *a*), a cărei diagramă de fazori este redată în fig. 2.8, *b*. Fie *OABC* steaua tensiunilor primare de fază cu sens de succesiune a fazelor identic cu sensul învîrtirii acelor ceosarnicului. Tensiunea $\underline{U}_{ax}$ a fazei secundare *ax* este în fază cu tensiunea $\underline{U}_{AX}$ a fazei primare, cu care interacționează ca și cum ar forma un transformator monofazat independent de celelalte faze. În mod analog, fazorul $\underline{U}_{by}$ este în fază cu fazorul primar corespunzător $\underline{U}_{BY}$ și fazorul $\underline{U}_{cz}$ în fază cu fazorul $\underline{U}_{CZ}$. În acest fel rezultă steaua *oabc* a tensiunilor

secundare de fază. Urmărind defazajul dintre două tensiuni între borne omoloage $\underline{U}_{AB}$ și $\underline{U}_{ab}$, se observă că el este nul. Ne convingem de acest lucru deplasînd prin translație steaua tensiunilor secundare pînă cînd punctul *a* coincide cu punctul *A*. Prin urmare, transformatorul Yy considerat aparține grupului 12. Un asemenea transformator se notează Yy—12 sau Yy—0.

Să considerăm clasa Yd (fig. 2.9). Reprezentăm steaua *OABC* a tensiunilor primare de fază și deducem poziția fazorilor tensiunilor secundare de fază. Pe fiecare coloană înfășurările primară și secundară funcționează la fel ca un transformator monofazat. Prin urmare, dacă înfășurările au același sens de bobinare, tensiunea $\underline{U}_{ax}$ este în fază cu tensiunea $\underline{U}_{AX}$. Dar $\underline{U}_{ax}=\underline{U}_{ac}$ și deci tensiunea $\underline{U}_{ac}$ este în fază cu tensiunea $\underline{U}_{AX}$. În mod analog, $\underline{U}_{ba}$ este în fază cu $\underline{U}_{BY}$ și $\underline{U}_{bc}$ cu $\underline{U}_{CZ}$. Pentru a stabili acum defazajul dintre două tensiuni între borne omoloage, de exemplu $\underline{U}_{AB}$ și $\underline{U}_{ab}$, să facem o mișcare de translație a triunghiului *abc* pînă cînd vîrful *a* coincide cu punctul *A* (fig. 2.9.). Se remarcă imediat că unghiul dintre $\underline{U}_{AB}$ și $\underline{U}_{ab}$, considerat în sensul succesiunii fazelor, este de 330° (egal cu unghiul acelor ceasornicului care indică ora 11). Prin urmare, transformatorul studiat este Yd—11.

În aceeași manieră se pot studia și celelalte clase de conexiuni.

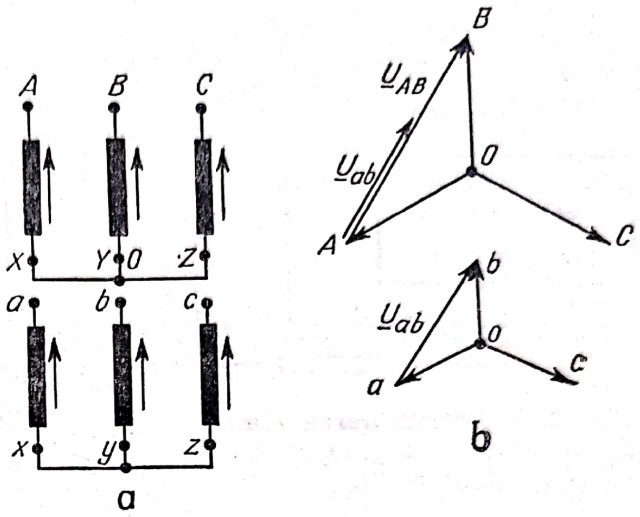


Fig. 2.8. Conexiunea Yy-12.

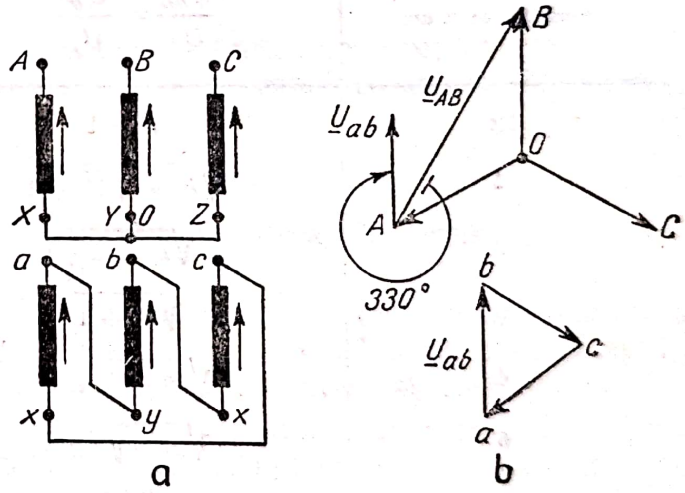


Fig. 2.9. Conexiunea Yd-11.

2.2.2. Verificarea grupei de conexiuni

Pentru verificarea sau determinarea grupei de conexiuni se utilizează două metode.

Metoda cosfimetrului. Se face montajul arătat în figura 2.10. Dacă cosfimetrul este gradat în multipli de 30° (de la 1 la 12), diviziunea indicată de cosfimetru va reprezenta chiar numărul grupei de conexiuni.

Scanned with OKEN Scanner

Metoda celor două voltmetre (fig. 2.11). Se alimentează transformatorul prin circuitul de joasă tensiune cu o tensiune redusă, bornele *A* și *a* fiind legate printr-un conductor.

Cu un voltmetru se măsoară tensiunile dintre bornele *b*—*B*, *b*—*C*, *c*—*B* și *c*—*C*. Se compară rezultatele obținute prin măsurare cu acelea

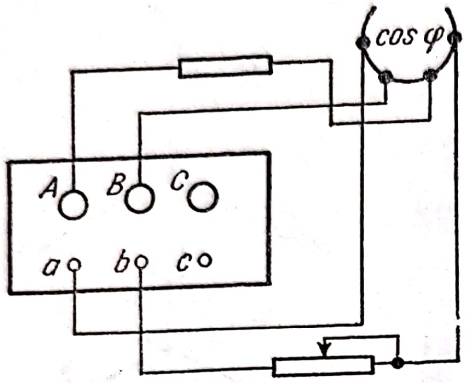


Fig. 2.10. Determinarea clasei de conexiuni cu ajutorul cosfimetrului.

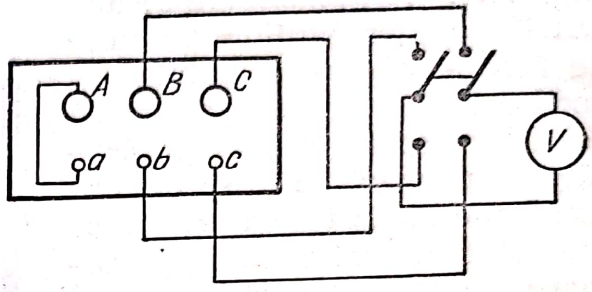


Fig. 2.11. Determinarea clasei de conexiuni cu ajutorul voltmetrului.

Tabelul 2.1

Indicații pentru verificarea grupelor de conexiuni

Grupa de conexiuni	$\frac{U_{bB}}{U_l} = \frac{U_{cC}}{U_l}$	U_{cB} în comparație cu U_{bB}
12	$k-1$	nu se mai măsoară
1	$\sqrt{k^2-\sqrt{3k}+1}$	$>$
2	$\sqrt{k^2-k+1}$	$>$
3	$\sqrt{k^2+1}$	$>$
4	$\sqrt{k^2+k+1}$	$>$
5	$\sqrt{k^2+\sqrt{3}k+1}$	$=$
6	$k+1$	nu se mai măsoară
7	$\sqrt{k^2+\sqrt{3}k+1}$	$<$
8	$\sqrt{k^2+k+1}$	$<$
9	$\sqrt{k^2+1}$	$<$
10	$\sqrt{k^2-k+1}$	$<$
11	$\sqrt{k^2+\sqrt{3}k+1}$	$=$

Scanned with OKEN Scanner

înscrise în tabelul 2.1, în care U_l este tensiunea dintre fazele circuitului de joasă tensiune măsurată cu ajutorul unui al doilea voltmetru, iar k raportul de transformare al transformatorului ($k>1$).

Fiecare grupă de mai sus cuprinde o serie întreagă de subgrupe şi în cadrul subgrupelor sînt specificate maşinile electrice şi transformatoarele care îndeplinesc un anumit rol funcţional.

Diversitatea mare a condiţiilor din exploatare privind funcţia pe care trebuie s-o îndeplinească o maşină electrică, a impus realizarea unui număr foarte mare de tipuri funcţionale de maşini electrice şi transformatoare (v. STAS 4861/1-73).

În concluzie, o mare atenţie trebuie dată alegerii tipului funcţional al maşinii electrice pentru a corespunde condiţiilor de exploatare.

2.3. ALEGEREA UNUI TRANSFORMATOR ÎN FUNCŢIE DE CONDIŢIILE DE EXPLOATARE

În primul capitol s-au arătat criteriile generale care stau la baza alegerii maşinilor electrice pentru ca acestea să corespundă condiţiilor de exploatare. Cele ce urmează se referă la unele cazuri particulare privitoare la transformatoare.

Transformatoarele electrice curente conform STAS 4861/1-73 sînt următoarele:

transformatoare de putere;
transformatoare pentru schimbarea numărului de faze;
transformatoare pentru utilizări speciale (transformatoare de sudură, de încercări etc.);
transformatoare de frecvenţă;
transformatoare de măsură.

În cele ce urmează se vor face referiri numai la transformatoarele electrice de putere, considerate uzuale.

Transformatorul de putere este transformatorul electric cu două sau mai multe înfăşurări izolate între ele, destinat a schimba tensiunea în vederea transportului, distribuţiei sau utilizării energiei electrice.

În cazuri particulare se execută transformatoare la care înfăşurările primară şi secundară au o parte comună, înfăşurarea de joasă tensiune făcînd parte din cea de înaltă tensiune; acest tip constructiv de transformator se denumeşte *autotransformator*.

Autotransformatoarele de putere se folosesc în general pentru interconectarea reţelelor de 110; 220 şi 400 kV.

Transformatoarele se construiesc uscate şi în ulei.

Transformatoarele uscate se construiesc numai pînă la puterea de 6300 VA şi 1000 V tensiunea nominală a reţelei în cazul transformatoarelor monofazate; pînă la 10 000 VA şi 1000 V în cazul celor trifazate. Transformatoarele uscate sînt deci transformatoare mici.

Scanned with OKEN Scanner

Prin STAS 3532—72 se stabilesc condițiile generale referitoare la transformatoarele mici. Acest standard trebuie utilizat în exploatare la alegerea transformatorului necesar.

Transformatoarele mici se construiesc în România pentru următoarele valori nominale:

tensiunile primare 24; 42; 125; 220; 380; 500; 660 și 1 000 V;

tensiunile secundare se precizează în standarde speciale sau în normele interne ale produselor;

puteri nominale pentru transformatoare monofazate de 25; 63; 100; 160; 250; 400; 630; 1 000; 1 600; 2 500; 4 000; 6 300 VA;

puteri nominale pentru transformatoare trifazate 630; 1000; 1600; 2 500; 4 000; 6 300; 10 000 VA.

Transformatoarele și autotransformatoarele în ulei se construiesc pentru valori mai mari ale puterii nominale și tensiunii primare.

Condițiile generale pentru transformatoarele în ulei sînt fixate în România prin STAS 1703-67, iar caracteristicile electrice prin STAS 440-62; aceste standarde trebuie consultate în exploatare la alegerea transformatorului în condițiile date.

Puterile nominale standardizate pentru transformatoarele în ulei sînt arătate în tabelul 2.2.

Tabelul 2.2

Puteri nominale standardizate pentru transformatoare, în kVA

6,3	10	16	25	40
63	100	160	250	400
630	1 000	1 600	2 500	4 000
6300	10 000	16 000	25 000	40 000
63000	100 000	160 000	250 000	400 000

În România prin STAS 930-65 s-au stabilit următoarele tensiuni nominale între faze, în volți, pentru instalațiile de transport și distribuție a energiei electrice: 380; 660; 6 000; 10 000; 20 000; (35 000); 110 000; 220 000 și 400 000.

Tensiunea de 35 000 V este admisă, dar se recomandă a fi evitată.

Instalațiile existente pentru transportul și distribuția energiei electrice avînd tensiunile nominale de: 500 V; 1 000 V; 3 000 V; 15 000 V; 30 000 V; și 60 000 V pot fi utilizate în continuare, dar se recomandă extinderea lor limitată numai în cazuri speciale și numai în jurul instalațiilor existente.

Industria noastră electrotehnică fabrică la Grupul de uzine Electroputere din Craiova următoarele tipuri de transformatoare în cadrul puterilor și tensiunilor standardizate:

— transformatoare de distribuție cu puteri între 100 și 1 600 kVA (fig. 2.12), pînă la tensiunea de 35 kV, cu înfășurări din cupru sau aluminiu (tabelele 2.3. și 2.4.);

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 2.3

Transformatoare de distribuție cu puteri între 100 și 1 600 kVA pînă la tensiunea de 35 kV (înfășurare din cupru)

Putere kVA	Tensiune înaltă kV	Tensiune joasă V	Grupa de conexiuni	U_k %	I_0 %
100	6—10 (II)	400 415 660	Yzo-5 Yyo-0	4,0	3,1
	15—20 (22)	400 415 660	Yzo-5 Yyo-0		
125	6—10 (II)	400 415 660	Yzo-5 Yyo-0	4,0	3,0
	15—20 (22)	400 415 660	Yzo-5 Yyo-0		
160	6—10 (II)	400 415 660	Yzo-5 Yyo-0	4,0	2,8
	15—20 (22)	400 415 660	Yzo-5 Yyo-0		
200	6—10 (II)	400 415 660	Yzo-5 Yyo-0	4,0	2,7
	15—20 (22)	400 415 660	Yzo-5 Yyo-0		
250	6—10 (II)	400 415 660	Yzo-5 Yyo-0	6,0	2,5
	15—20 (22)	400 415 660	Yzo-5 Yyo-0		
	35 (30)	400 415 660	Yzo-5 Yyo-0		2,8
315	6—10 (II)	400 415 660	Dyo-5 Yyo-0	6,0	2,4
	15—20 (22)	400 415 660	Dyo-5 Yyo-0		
	35 (30)	400 415 660	Dyo-5 Yyo-0		2,6
400	6—10 (II)	400 415 660	Dyo-5 Yyo-0	6,0	2,3
	15—20 (22)	400 415 660	Dyo-5 Yyo-0		
	35 (30)	400 415 660	Dyo-5 Yyo-0		2,7
500	6—10 (II)	400 415 660	Dyo-5 Yyo-0	6,0	2,2
	15—20 (22)	400 415 660	Dyo-5 Yyo-0		
	35 (30)	400 415 660	Dyo-5 Yyo-0		2,6
630	6—10 (II)	400 415 660	Dyo-5 Yyo-0	6,0	2,1
	15—20 (22)	400 415 660	Dyo-5 Yyo-0		
	35 (30)	400 415 660	Dyo-5 Yyo-0		2,5

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 2.3 (continuare)

Putere kVA	Tensiune înaltă kV	Tensiune joasă V	Grupa de conexiuni	U_k %	I_0 %	Putere	Tensiune înaltă kV	Tensiune joasă V	Grupa de conexiuni	U_k %	I_0 %
800	6—10 (II)	400 415 660	Dyo-5 Yyo-0	6,0	1,9	1250	6—10 (II)	400 415 660	Dyo-5 Yyo-0	6,0	1,65
	15—20 (22)	400 415 660	Dyo-5 Yyo-0				15—20 (22)	400 415 660	Dyo-5 Yyo-0		
	35 (30)	400 415 660	Dyo-5 Yyo-0		2,3		35 (30)	400 415 660	Dyo-5 Yyo-0		2,0
1000	6—10 (II)	400 415 660	Dyo-5 Yyo-0	6,0	1,8	1600	6—10 (II)	400 415 660	Dyo-5 Yyo-0	6,0	1,45
	15—22 (22)	400 415 660	Dyo-5 Yyo-0				15—20 (22)	400 415 660	Dyo-5 Yyo-0		
	35 (30)	400 415 660	Dyo-5 Yyo-0		2,1		35 (30)	400 415 660	Dyo-5 Yyo-0		1,8

— transformatoare cu puteri cuprinse între 2,5 și 125 MVA la 110 kV, cu două și trei înfășurări, cu sau fără reglaj sub sarcină pentru funcționarea în rețea (tabelele 2.5 și 2.6 și fig. 2.13);

— transformatoare bloc de mare putere, pentru tensiuni peste 110 kV (tabelul 2.7 și fig. 2.14);

— transformatoare pentru interconectarea rețelelor de 110; 220; 400 kV (tabelul 2.8 și fig. 2.15).

Un mare succes al industriei noastre electrotehnice îl constituie realizarea cu forțe proprii a autotransformatorului de 400 MVA, 400 kV, format din trei unități monofazate și avînd reglajul sub sarcină (pe partea de neutru) într-o unitate separată.

În afară de alegerea corespunzătoare a transformatorului din punctul de vedere al puterii și tensiunilor primare și secundare, trebuie examinate atent și condițiile de exploatare, specifice în general funcționării transformatoarelor.

Transformatorul funcționează în paralel cu o altă unitate existentă.

Se știe că pot funcționa în paralel transformatoarele care îndeplinesc următoarele condiții:

au aceleași tensiuni nominale primare și secundare în limita toleranțelor standardizate;

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 2.4

Transformatoare de distribuție cu puteri între 100 și 1 600 kVA pînă la tensiunea de 35 kV (înfășurare din aluminiu)

Putere kVA	Tensiune înaltă kV	Tensiune joasă V	Grupa de conexiuni	U_k %	I_0 %	Putere kVA	Tensiune înaltă kV	Tensiune joasă V	Grupa de conexiuni	U_k %	I_0 %
100	6	400 525	Yzo-5 Yyo-0	4,0	3,4	630	6	400 525	Dyo-5 Yyo-0	6,0	2,4
	10	400 525	Yzo-5 Yyo-0				10	400 525	Dyo-5 Yyo-0		
	15	400 525	Yzo-5 Yyo-0				15	400 525	Dyo-5 Yyo-0		
	20	400 525	Yzo-5 Yyo-0				20	400 525	Dyo-5 Yyo-0		
							35	400 525	Yyo-0		2,5
160	6	400 525	Yzo-5 Yyo-0	4,0	3,15	1 000	6	400 525	Dyo-5 Yyo-0	6,0	2,0
	10	400 525	Yzo-5 Yyo-0				10	400 525 6 300	Dyo-5 Yyo-0		
	15	400 525	Yzo-5 Yyo-0				15	400 525 6 300	Dyo-5 Yyo-0		
	20	400 525	Yzo-5 Yyo-0				20	400 525 6 300	Dyo-5 Yyo-0		
250	6	400 525	Dyo-5 Yyo-0	4,0	2,9		35	400 525 6 300	Dyo-5 Yyo-0		2,1
	10	400 525	Dyo-5 Yyo-0			1 600	6	400 525	Dyo-5 Yyo-0	6,0	1,7
	15	400 525	Dyo-5 Yyo-0				10	400 525 6 300	Dyo-5 Yyo-0		
	20	400 525	Dyo-5 Yyo-0				15	400 525 6 300	Dyo-5 Yyo-0		
	35	400 525	Yyo-0	6,0	3,1		20	400 525 6 300	Dyo-5 Yyo-0		
400	6	400 525	Dyo-5 Yyo-0	6,0	2,65		35	400 525 6 300	Dyo-5 Yyo-0		1,8
	10	400 525	Dyo-5 Yyo-0								
	15	400 525	Dyo-5 Yyo-0								
	20	400 525	Dyo-5 Yyo-0								
	35	400 525	Yyo-0		2,8						

Scanned with OKEN Scanner

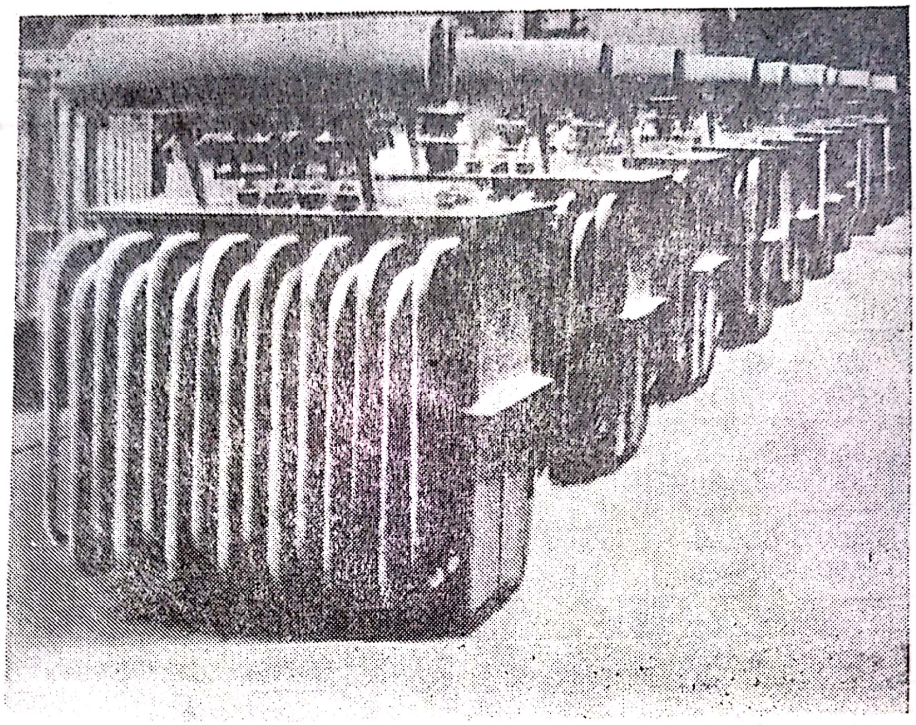


Fig. 2.12. Transformatoare de distribuție cu puteri cuprinse între 100 și 1 600 kVA și tensiuni pînă la 35 kV.

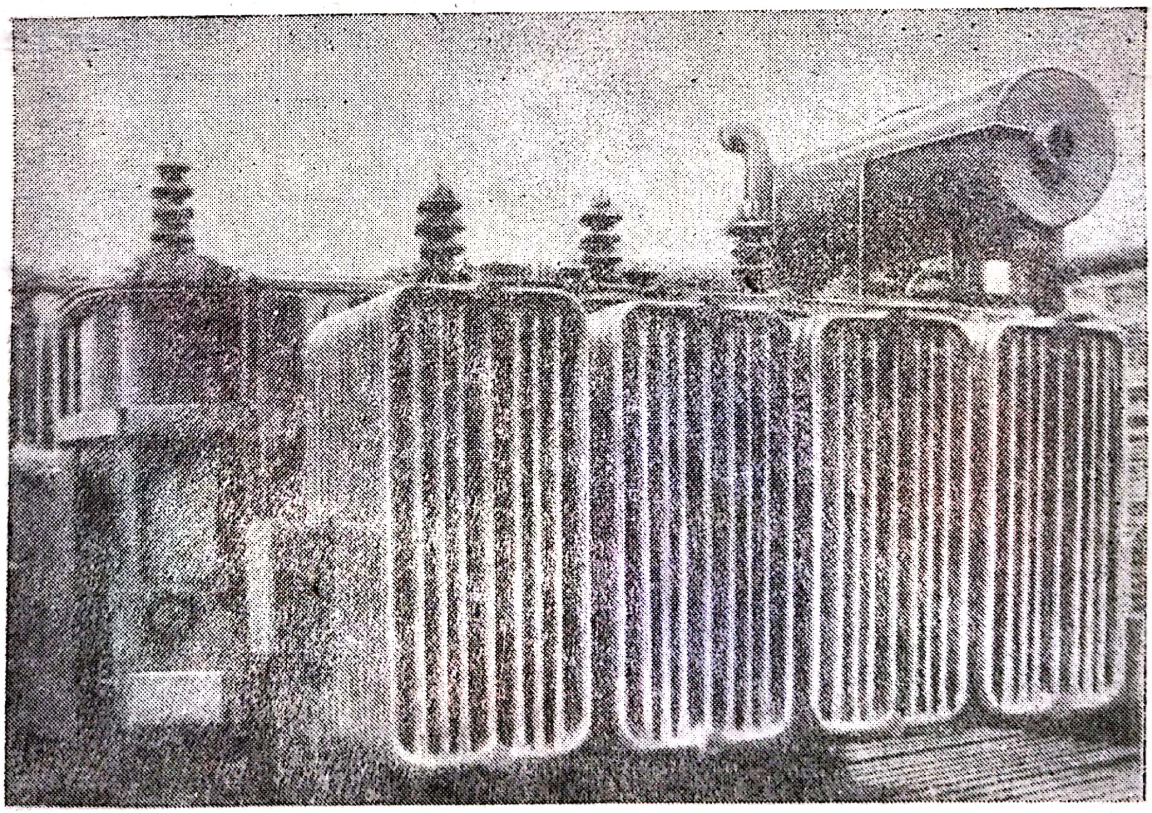


Fig. 2.13. Transformatoare cu puteri cuprinse între 2,5 și 125 MVA și tensiuni pînă la 110 kV.

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 2.5

Transformatoare cu puteri între 2,5 și 125 MVA și tensiuni pînă la 116 kV cu două înfășurări

Putere MVA	Tensiune înaltă kV	Tensiune joasă kV	Reglajul înaltei tensiuni, %		Grupa de conexiuni	U_k %
			fără sarcină	în sarcină		
4	15 22 25 35	6,3 6,3 6,3 6,3; 15,75	±2×2,5		Yd-5 Yd-5; Yod-1 Yd-5 Yd-5; Yod-1	7
6,3	10,5 15 22 25 35	6,3 6,3 6,3; 10,5 6,3 6,3; 15,75	±2×2,5		Dd-0 Yd-5 Yd-5; Yd-1 Yy-0; Yd-5 Yy; Yo-5	7 8 8; 7 8 7; 8
10	22; 35 110 110 35 110	6,3 6,6 11 15,75 22	±2×2,5 ±2×2,5	 ±9×1,78 ±9×1,78 ±9×1,78	Yy; Yo-5 Yd-11 Yd-11 Yd-5 Yd-11	7 11 11 7 11
16	10,5 15 38,5 110	6,5 6,3 6,6; 6,3 6,6; 11	±2×2,5 ±2×2,5 ±2×2,5	 ±9×1,78	Dd-0 Dd-0 Yd-5; Yd-11 Yd-11	10 10 8 11
25	35; 110; 116; 110; 116 110 110	6,3 6,6 11 22		±9×1,78 ±9×1,78 ±9×1,78 ±9×1,78	Yd-11 Yd-11 Yd-11 Yd-11	10; 11 11 11 11
40	110	6,3 6,6 11 22		±9×1,78	Yd-11	12
63 80 115	110 116 116	6,6 10,5 10,5		±9×1,78 ±9×1,78 ±9×1,78	Yd-11 Yd-11 Yd-11	12 11,5 12,5

au aceeași grupă de conexiuni;
au raportul puterilor nominale mai mic decît 3 : 1;

Se știe că transformatoarele din grupa de conexiuni 11 pot funcționa în paralel cu transformatoarele care aparțin grupei de conexiuni 5, dacă sînt satisfăcute celelalte condiții de funcționare în paralel și dacă legarea bornelor celor două transformatoare este făcută după una din cele trei variante indicate în tabelul 2.9.

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 2.6

Transformatoare cu puteri între 2,5 și 125 MVA și tensiuni pînă la 116 kV cu trei înfășurări

Putere MVA	Tensiune înaltă kV	Tensiune medie V	Tensiune joasă kV	Reglajul sub sarcină a IT %	Grupa de conexiuni	U_k %
6,3/6,3/6,3	35	22	6,3	$\pm 2 \times 2,5$	Ydd 11-11	7: 13; 5
0/10/10	110	16,5 22 38,5	6,6 6,6 6,6; 16,5; 22	$\pm 9 \times 1,78$	Yyd 0-11	10,5; 17,5; 6
16/10/16	110	22 27,5	6,6 6,6	$\pm 9 \times 1,78$	Yyd 0-11	10,5; 17,5; 6
25/16/25	110	22	6,6	$\pm 9 \times 1,78$	Yyd 0-11	10; 17; 6
25/25/25		38,5 27,5	6,6; 6,3; 11; 16,5; 6,6; 10,5			
40/25/40		16,5(22)	6,6	$\pm 9 \times 1,78$	Yyd 0-11	10,5; 17,5; 6
40/40/25		38,5	6,6; 11; 16,5			
63/63/21	110	36,75	10,5	$\pm 9 \times 1,78$	Yyd 0-5	11; 18; 6
80/80/80	116	37	10,5	$\pm 9 \times 1,78$	Yyd 0-11	14; 18; 6

Tabelul 2.7

Transformatoare bloc de mare putere pentru tensiuni peste 110 kV

Putere MVA	Tensiune înaltă kA	Tensiune joasă kV	Reglajul IT %	Grupa de conexiuni	U_k %	Masa, t	
						totală	a uleiului
40	242	10,5	± 5	i/i/i	10	63	13,5
190	242	15,75	± 5	Y_0 d—5	12,5	206	31
250	242	15,75	± 5	Y_0 d —	12,5	265	39

Conexiunile care pot fi folosite pentru transformatoare sînt redate în tabelul 2.10 și corespund cu STAS 1703-67.

Transformatorul este supus în exploatare unor eforturi electrodinamice mai mari decît cele admisibile (STAS 1703—67) pentru transformatoarele curente.

Scanned with OKEN Scanner

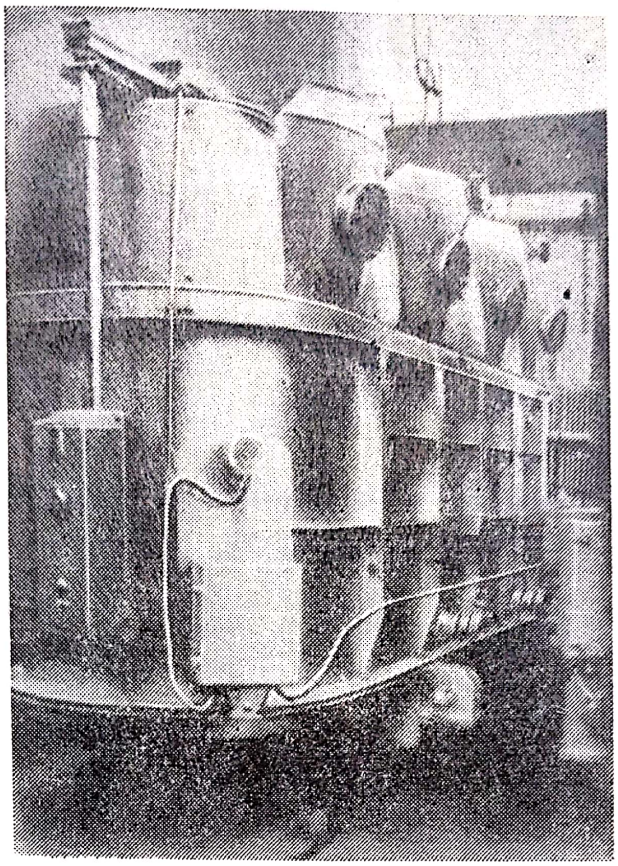


Fig. 2.14.Transformator bloc de mare putere, pentru tensiuni peste 110 kV.

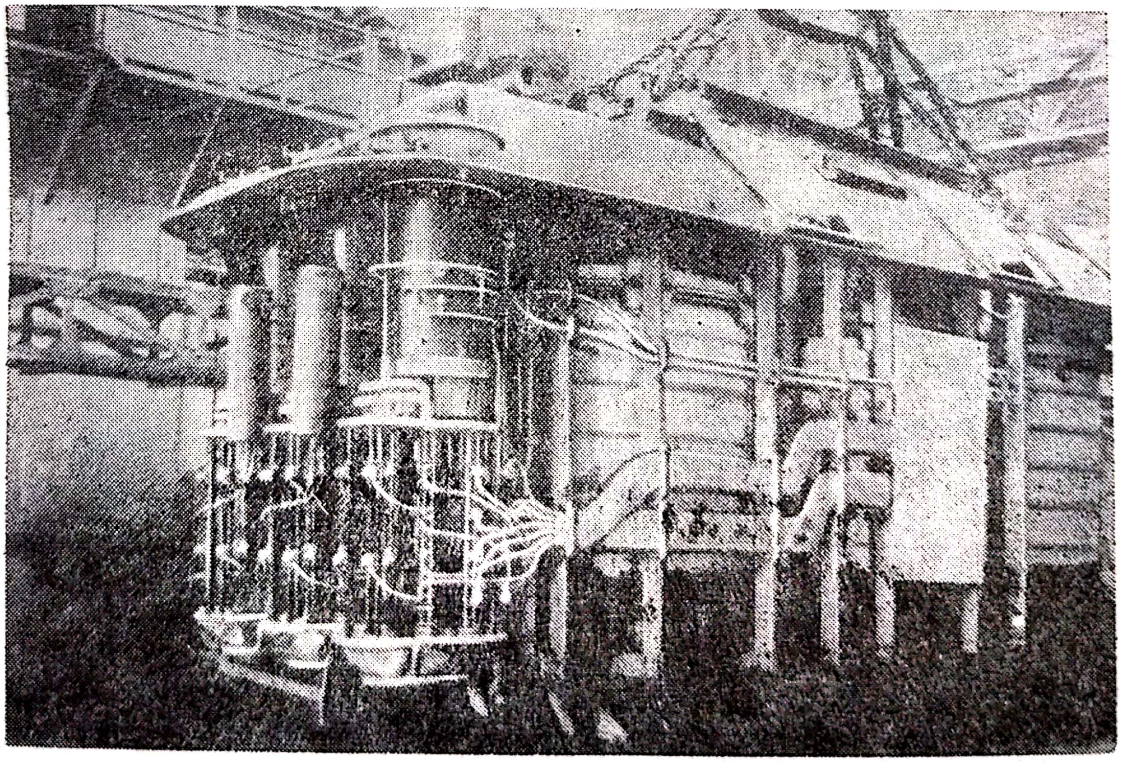


Fig. 2.15. Autotransformatoare pentru interconectarea rețelelor de 110, 220 și 400 kV.

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 2.8

Autotransformatoare pentru interconectarea rețelelor de 110, 220 și 400 kV

Putere MVA	Tensiune înaltă kV	Tensiune medie kV	Tensiune joasă kV	Reglajul IT kV	Grupa de conexiuni	U_k %	Masă, t	
							totală	a uleiului
100/100/30	231	121	10,5	$\pm 12 \times 1{,}25$	Y_0d-5	10	145	40
200/200/60	231	121	10,5	$\pm 12 \times 1{,}25$	Y_0d-5	10	199	55,9
400/400/160	400	220	22	$\pm 12 \times 1{,}25$	Y0d-5	10	285[1]	60[1]

[1] Numărul pentru unitatea principală.

Tabelul 2.9

Variante de legare a bornelor la funcționarea în paralel a transformatoarelor

Grupa de conexiuni	Tensiunea	
	înaltă	joasă
Dy-5; Yd-5; Yz-5	*A B C*	*a b c*
Dy-11; Yd-11; Yz-11	*A B C*	*c b a*
Dy-5; Yd-5; Yz-5	*A B C*	*a b c*
Dy-11; Yd-11; Yz-11	*C B A*	*b a c*
Dy-5; Yd-5; Yz-5	*A B C*	*a b c*
Dy-11; Yd-11; Yz-11	*B A C*	*a c b*

Eforturile electrodinamice sînt cauzate de șocul de curent de scurtcircuit brusc.

Pentru ca un transformator de putere să poată funcționa în condiții severe de eforturi electrodinamice, trebuie construit pentru condiții speciale, în funcție de valorile eforturilor respective.

Pentru a se înțelege mai bine acest lucru se dau exemple din realizările uzinelor „Electroputere" din Craiova. Astfel, datorită regimului de lucru al blumingului de 1 300 mm de la Combinatul Siderurgic din Hunedoara, a fost cerut de către beneficiar un transformator de 40 MVA de construcție întărită care să reziste la șocuri de curent corespunzător unei puteri pînă la 60 MVA.

În urma calculelor efectuate s-a ajuns la concluzia că este necesar un transformator avînd:

puterea nominală 50 MVA;
puterea de șoc (cu frecvența șocurilor 10—15 min) 60 MVA;
tensiunea de scurtcircuit 15% la 50 MVA, 12% la 40 MVA;
răcirea cu circulație forțată a uleiului și suflaj cu aer;
consolidarea specială a bobinelor.

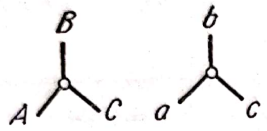
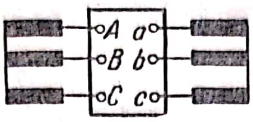
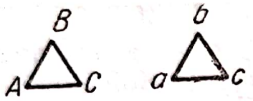
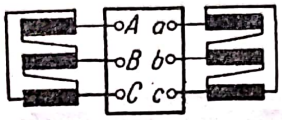
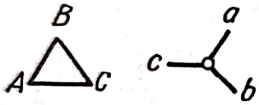
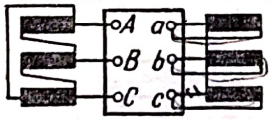
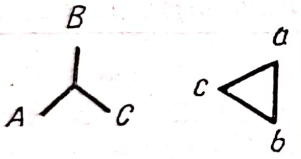
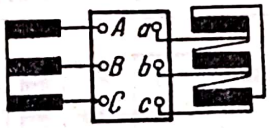
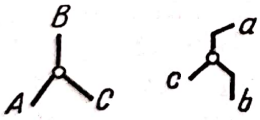
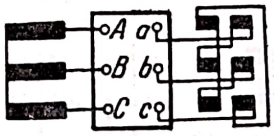
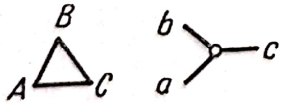
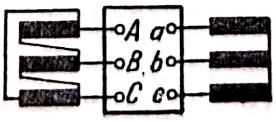
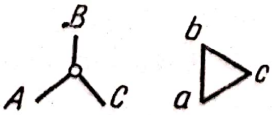
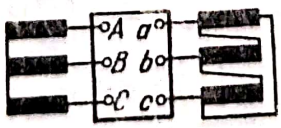
În concluzie, deși puterea în funcționare de durată necesară era de 40 MVA, totuși s-a propus un transformator de 50 MVA pentru a face față șocurilor de curent.

La solicitarea Combinatelor Siderurgice din Hunedoara și Galați de a se realiza un transformator de 40 MVA cu siguranță mărită la scurtcircuit brusc, Grupul de uzine Electroputere din Craiova, a satisfăcut cererile combinatelor prin modificarea transformatorului normal 40/40/25 MVA 110/38,5/6,6 kV cu tensiunea de scurtcircuit 6%; 10,5%; 18%. S-a obținut astfel un transformator 40/40/40 kVA 38,5/110/6,6 kV cu tensiunile de scurtcircuit 11%; 16,5%; 30%.

Scanned with OKEN Scanner

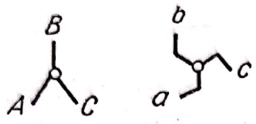
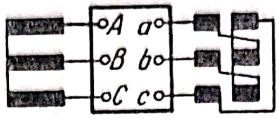
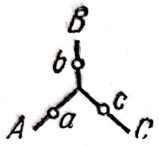
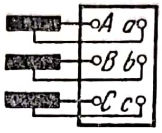
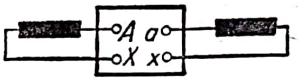
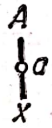
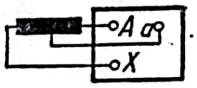
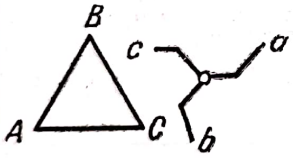
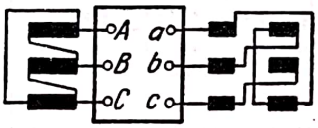
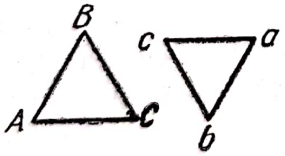
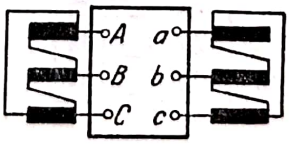
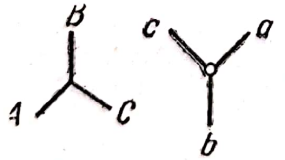
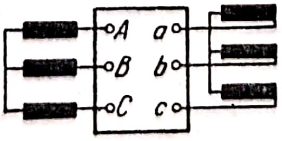
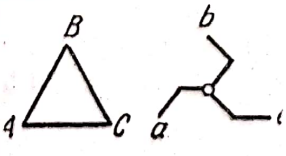
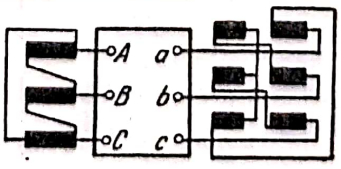
Conexiuni folosite la transformatoare

Tabelul 2.10

Simbol	Diagrama de fazori a tensiunilor IT / JT	Schema de conexiuni a înfăşurărilor IT / T	Raport de transformare $U_{L1}; U_{L2}$	Domeniul de utilizare
		A. STANDARDIZATE		
Yy-0			$\frac{w_1}{w_2}$	Transformatoare coborîtoare pentru distribuţie de forţă; transformatoare ridicătoare
Dd-0			$\frac{w_1}{w_2}$	Transformatoare coborîtoare pentru distribuţie de forţă
Dy-5			$\frac{w_1}{\sqrt{3}w_2}$	Transformatoare coborîtoare pentru distribuţie de lumină. Firul neutru se poate încărca 100%
Yd-5			$\frac{\sqrt{3}w_1}{w_2}$	Transformatoare ridicătoare sau coborîtoare pentru centrale şi staţii
Yz-5			$\frac{2w_1}{\sqrt{3}w_2}$	Acelaşi ca la conexiunea Dy-5 numai pînă la 160 kVA
Dy-11			$\frac{w_1}{\sqrt{3}w_2}$	Acelaşi ca la conexiunea Dy-5
Yd-11			$\frac{\sqrt{3}w_1}{w_2}$	Acelaşi ca la conexiunea Yd-5

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 2.10 (continuare)

Simbol	Diagrama de fazori a tensiunilor *IJ* *IT*	Schema de conexiuni a înfăşurărilor *T*	Raport de transformare $U_{L1}:U_{L2}$	Domeniul de utilizare
Yz-11			$\frac{2w_1}{\sqrt{3}w_1}$	Acelaşi ca la conexiunea Yz-5
Y-0			$\frac{w_1+w_2}{w_2}$	Autotransformatoare pentru interconectarea reţelelor de transport a energiei electrice
Ii-0			$\frac{w_1}{w_2}$	Transformatoare ridicătoare cuplate bloc cu generatoarele, montate în locuri greu accesibile
I-0			$\frac{w_1+w_2}{w_2}$	Acelaşi ca la conexiunea Y-0
	B. NESTANDARDIZATE			
Dz-0				
Dd-6				
Yy-6				
Dz-6				

Scanned with OKEN Scanner

Mărirea tensiunilor de scurtcircuit prin modificarea dispunerii înfășurărilor față de varianta de bază a condus la îmbunătățirea rezistenței la scurtcircuitul brusc.

Este de reținut că analiza și cunoașterea corespunzătoare a condițiilor reale din exploatare conduce la alegerea optimă a transformatoarelor și astfel la evitarea unor cheltuieli neeconomice.

2.4. PUNEREA ÎN FUNCȚIUNE A UNUI TRANSFORMATOR

Transformatoarele de putere din stațiile de transformare ale întreprinderilor mari sau mici, sau din stațiile de transformare ale sistemului național, sînt unități de sine stătătoare, care prin buna funcționare asigură desfășurarea normală a activității economice a întreprinderilor sau a zonei din sistemul național pe care le deservesc.

Punerea în funcțiune, întreținerea și prevenirea defectelor la transformatoarele de putere și în special la cele de puteri mari, necesită cunoașterea amănunțită a construcției transformatoarelor, inclusiv a accesoriilor care le deservesc.

Se consideră util înainte de tratarea problemelor referitoare la punerea în funcțiune, întreținerea și determinarea defectelor și a regimurilor anormale de funcționare, să se prezinte o descriere scurtă privind construcția transformatoarelor de putere medie, care au cea mai largă utilizare (din gama 4—25 MVA cu două sau trei înfășurări).

2.4.1. Construcția transformatoarelor [61—64]

Circuitul magnetic (miezul) este construit din tablă silicioasă laminată la rece de 0,35; 0,3 sau 0,28 mm grosime, izolată cu carlit, cu pierderi specifice (la inducția de 1,0 T și la frecvența de 50 Hz) de maximum 0,4 W/kg.

Miezurile pot fi simple sau în dublă ramă.

Coloanele sînt împachetate prin țesere și sînt rigidizate prin ungerea tolelor cu un lac special. Pentru strîngerea coloanelor, în cazul miezurilor simple se folosesc plăci de siluminiu și centuri; în cazul miezurilor în dublă-ramă, plăci de presare sudate. Jugurile sînt strînse cu schele făcute din tablă sudată; strîngerea se face în cazul miezurilor simple cu buloane, iar în cazul miezurilor în dublă ramă cu plăci de presare demontabile. Construcția miezului magnetic este dată în fig. 2.16.

Pentru rigidizarea miezului, schela superioară este prinsă de schela inferioară cu ajutorul unor tiranți din oțel.

Miezul (împreună cu înfășurările) poate fi ridicat cu ajutorul unui cablu folosind urechile prevăzute pe schela superioară.

Întreg miezul este legat la masă.

Înfășurările sînt executate din sîrmă sau bară de cupru electrolitic izolată cu hîrtie. Ele sînt proiectate și executate astfel ca să reziste la

Scanned with OKEN Scanner

eforturile electrodinamice și termice de scurtcircuit și la undele de șoc de tensiune.

Înfășurările sînt dispuse pe miez într-una din variantele arătate în fig. 2.17.

Înfășurările *JT* și *IT* sînt de tip continuu și sînt executate pe cilindri de pertinax, de transformerboard sau de hîrtie izolantă. În funcție

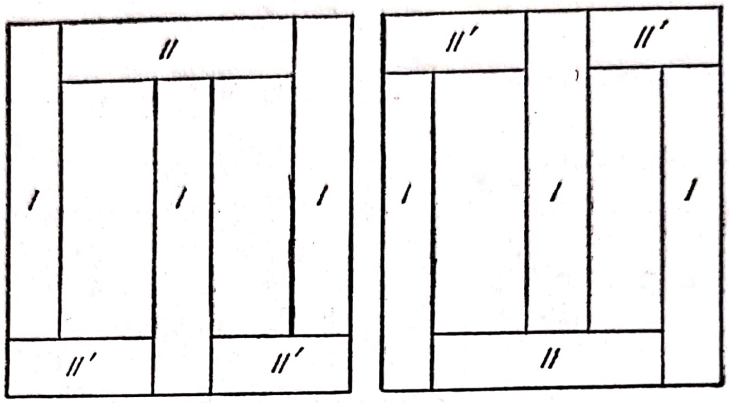


Fig. 2.16. Construcția circuitului magnetic al unui transformator trifazat, realizat prin suprapunerea consecutivă a unor straturi de tole: *I* — tole pentru coloane (miez); *II* și *II'* — tole pentru juguri.

de curent, se folosesc unul sau mai multe conductoare în paralel. Pentru înfășurarea *JT*, în special la curenți mari, se folosește uneori înfășurarea spiralată, cu transpoziția corespunzătoare a conductoarelor.

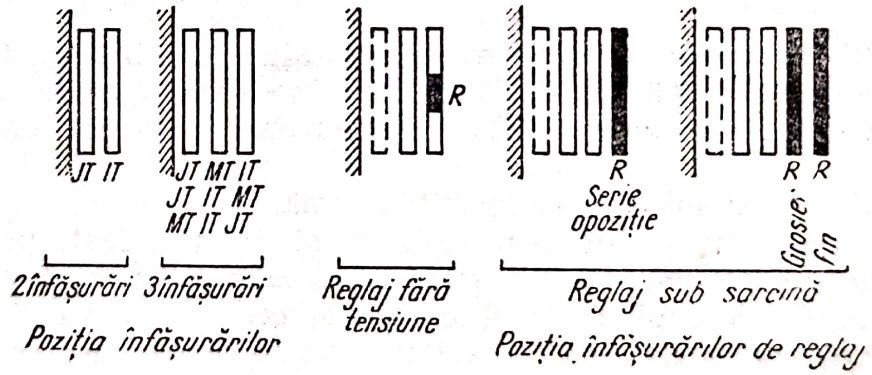


Fig. 2.17. Așezarea înfășurărilor pe miezuri:
JT — joasă tensiune; *MT* — medie tensiune; *IT* — înaltă tensiune.

Conexiunile sînt făcute cu conductoare — funie din cupru electrolitic izolate cu hîrtie (aproximativ 8 mm pe rază). Rigidizarea și fixarea lor se face cu ajutorul unor teci din hîrtie, a unor benzi izolante cu inserție și a unor plăci-suport din transformerboard.

Presarea bobinelor se poate face direct, cu ajutorul jugurilor și tiranților, sau prin intermediul unor inele metalice și a unor buloane speciale de presare.

Scanned with OKEN Scanner

Comutatorul de reglaj folosit la transformatoarele cu reglajul executat în absența tensiunii, este de tip rotativ (fig. 2.18, *a*). Acționarea lui se face cu ajutorul unui dispozitiv montat pe capac. Manevrarea dispozitivului se face în mod obișnuit de pe capac sau de la sol cu ajutorul unei manivele.

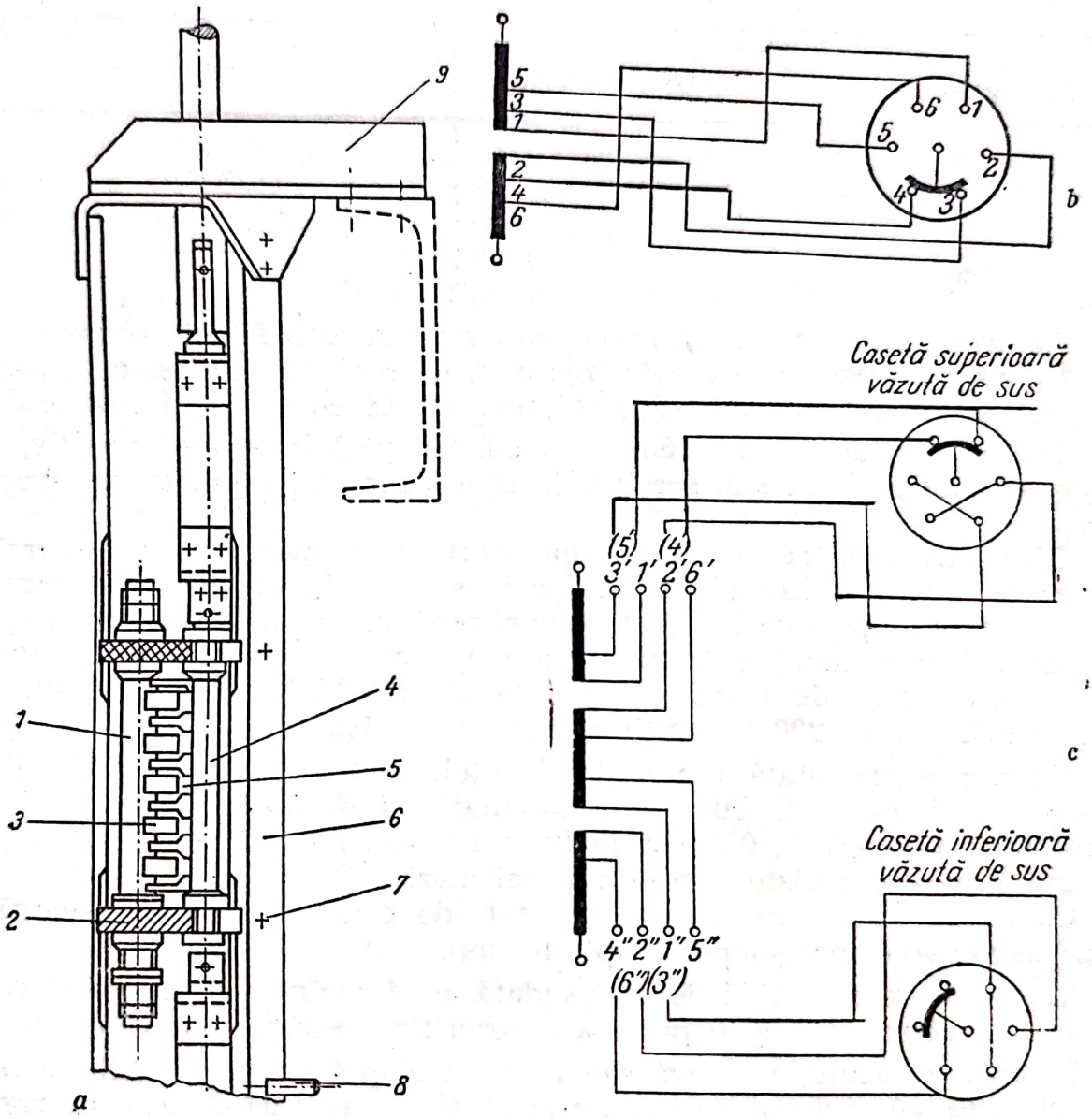


Fig. 2.18. Comutator rotativ de reglaj:

a — construcție; *b* — schema legăturilor unei casete (faze) la un comutator cu trei casete; *c* — schema legăturilor unei casete (faze) la un transformator cu trei comutatoare a cîte două casete fiecare; *1* — contact fix (bornă); *2* — placă stator; *3* — contact mobil; *4* — axul casetei; *5* — resort; *6* — bară de legătură; *7* — șurub; *8* — știftul suportului; *9* — suportul comutatorului.

Pentru identificarea poziției pe care se găsește comutatorul la un moment dat, pe capacul dispozitivului de acționare sînt marcate cinci poziții în sensul orar. Numerotarea treptelor de reglaj se face de la 1 la *n*, cifra 1 corespunzînd celui mai mare număr de spire al înfășurării.

Scanned with OKEN Scanner

Legarea prizelor înfăşurării la contactele fixe ale casetelor comutatorului se face ca în fig. 2.18, *b*, şi 2.18, *c* şi după indicaţiile din tabelul 2.11.

Tabelul 2.11

Legarea prizelor înfăşurării la comutator

Treapta	Prizele conectate	Tensiunea
1	1—2	$+1{,}05\ U_n$
2	2—3	$+1{,}025\ U_n$
3	3—4	$1\ U_n$
4	4—5	$-1{,}025\ U_n$
5	5—6	$-1{,}05\ U_n$

La transformatoarele cu reglaj sub sarcină este folosit comutatorul tip 3 Jansen. Acesta este de tip îngropat, cu reglaj pe nul şi cu contactele de rupere într-o cuvă separată, inclusă în cuva transformatorului.

Pentru tensiuni pînă la 60 kV şi curenţi pînă la 200 A inclusiv, se poate executa reglajul sub sarcină, la conexiunea triunghi, cu un singur comutator.

Dispozitivul de acţionare a comutatorului, montat pe cuvă, permite acţionarea manuală sau electrică, locală sau de la distanţă a acestuia. Dispozitivul este prevăzut cu indicator al poziţiei comutatorului şi cu aparate de măsurat montate pe un panou, în sala de comandă. Tensiunea motorului asincron de antrenare este de 380/220 V, 50 Hz, iar tensiunea de comandă este de 220 V, continuă sau alternativă.

Cuva este executată din tablă de oţel, în construcţie sudată, fiind consolidată cu nervuri. Cuva este calculată ca să reziste la o presiune hidraulică interioară de 0,6 bari la fundul cuvei. La cerere se pot realiza construcţii care să reziste la presiuni mai mari.

Ca formă constructivă, cuvele pot fi de construcţie clasică (cuvă+capac) sau cuve clopot (clopotul+platforma).

Capacul este din tablă de oţel sudată, cu întăriturl şi are pe el conservatorul, izolatoarele şi o parte a accesoriilor transformatorului.

Fixarea capacului pe cuvă sau a cuvei clopot de platformă, se face în mod etanş, cu ajutorul buloanelor şi al unei garnituri de cauciuc rezistent la ulei.

Pentru răcire cuva are radiatoare construite din ţevi sudate, în număr suficient pentru a asigura o răcire bună în condiţii normale de funcţionare. Între radiatoare şi cuvă sînt intercalate clapete care permit separarea radiatoarelor de cuvă şi demontarea lor în vederea transportului sau a unor eventuale reparaţii. Fiecare radiator are urechi de ridicare, la partea superioară un buşon de aerisire, iar la partea inferioară un buşon de golire.

În cazul răcirii cu suflaj de aer, sub fiecare radiator se află ventilatoare acţionate cu motoare electrice care asigură răcirea necesară. Mo-

Scanned with OKEN Scanner

torul de antrenare la unele ventilatoare are puterea de 180 W și tensiunea de 380/220 V, 50 Hz.

Toată construcția metalică a transformatorului este protejată prin vopsire cu vopsea rezistentă la intemperii.

Pentru deplasarea transformatorului, la partea inferioară a cuvei este prevăzut căruciorul de transport, cu roți cu rebord, avînd ecartamentul normal de 1435 mm (sau alt ecartament, la comandă). Roțile dau posibilitatea deplasării în două direcții perpendiculare, prin schimbarea poziției lor, după ce cuva a fost ridicată pe cricuri.

Pentru ridicarea în macara, cuva are prevăzute patru urechi; pentru ridicarea cu cricul are patru umeri sudați lateral în partea inferioară; pentru tracțiunea în planul orizontal, are patru ochiuri speciale dedesubt.

Transformatorul poate fi ridicat fie complet montat (atunci cînd construcția permite acest lucru) fie parțial demontat fără conservator, izolatoare de *IT*, radiatoare etc.

În ambele cazuri se folosesc urechile de ridicare de pe cuvă. Cuvele clopot au în afara urechilor cuvei și urechi de ridicarea întregului transformator, plasate pe platforma inferioară (în partea de jos a transformatorului).

Pentru ridicarea părții decuvabile (miez și înfășurări + capac) servesc urechile speciale de ridicare sudate fie pe capac, fie pe schela superioară, fiind accesibile de pe capac prin deschizături speciale astupate cu flanșe.

Izolatoarele se aleg în funcție de valoarea tensiunii nominale; pot fi de tip obișnuit de trecere, sau de tip condensator umplute cu ulei propriu.

La izolatoarele de tip condensator, pentru a asigura pătrunderea uleiului din transformator în partea inferioară a izolatorului, trebuie deșurubat bușonul de aerisire aflat pe flanșa izolatorului.

La cerere, se pot monta pe borne, în interiorul izolatoarelor, transformatoare de curent.

Izolatoarele de *MT* și *IT* se pot monta și înlocui fără decuvare, după o golire parțială a uleiului din cuvă. Izolatoarele de *JT* se pot demonta fără decuvare numai dacă cuva este de tipul clopot.

Pentru transport, izolatoarele care ies din gabarit se demontează și se înlocuiesc cu flanșe oarbe. Restul izolatoarelor se acoperă cu capace de protecție.

Conservatorul are o singură cameră la transformatoarele cu reglaj în absența tensiunii, iar la cele cu reglaj sub sarcină — două (una servind drept conservator al comutatorului de reglaj). Cele două camere sînt separate printr-un perete demontabil. În afară de acestea, conservatoarele au un perete lateral demontabil, o gură de vizitare și urechi de ridicare în partea de sus.

Camerele comunică prin intermediul unor racorduri cu comutatorul de reglaj, respectiv cu transformatorul. Între ele, camerele comunică prin două orificii executate în peretele separator: unul la partea inferioară, prevăzut cu un filtru de ulei, pentru circulația uleiului între cele două

Scanned with OKEN Scanner

camere şi altul la partea superioară, servind la echilibrarea presiunii aerului între cele două camere.

Fiecare cameră este prevăzută cu o cutie pentru colectarea impurităţilor. Cutia are robinet de golire.

Dacă conservatorul nu are buşon special de umplere, aceasta se face prin flanşa superioară de vizitare.

Accesoriile oricărui tip de transformator pot fi diferite în privinţa poziţiilor şi dimensiunilor, în funcţie de cererea clientului.

Accesoriile pe conservator sînt: robinetul de golire, indicatorul magnetic al nivelului uleiului din conservator şi ţeava de racord cu filtru de aer.

Accesoriile de pe capac (sau de pe partea superioară a cuvei clopot) pot fi: releul de gaze Buchholz (fig. 2.19), montat între conservator şi cuva transformatorului; robinetul de închidere pe racordul conservator-releu Buchholz; releul RUS—1000 (un releu intermediar de fabricaţie poloneză comandat de releul Buchholz şi care are caracteristicile 6A/0,3A—220 V), montat între conservator şi comutatorul de reglaj sub sarcină, cu rolul de închidere a circuitelor de comandă în caz de avarie semnalată de releul Buchholz; robinetul de închidere pe racordul conservator — releu RUS—1000; termometru cu mercur gradat în mod obişnuit de la 0 la 150°C (teaca termometrului pătrunde la 100 mm sub capac); locaşul traductorului termometrului cu cadran; semnalizatorul termic de pericol, montat numai la cerere; supapa de siguranţă pentru evitarea suprapresiunii în cuvă; robinetul de umplere (dacă nu este plasat pe peretele cuvei); dispozitivul de acţionare a comutatorului, la transformatoarele cu reglaj în absenţa tensiunii şi cutie de borne pentru transformatoarele de curent (numai la cerere).

Accesoriile de pe cuvă pot fi: robinetul de umplere (dacă nu este plasat pe capac); buşoanele de luat probe de ulei la trei nivele; robinetul de golire a cuvei; buşonul de curăţire plasat pe fundul cuvei; ferestrele de vizitare pentru accesul la contactele selectorului comutatorului (numai la transformatoarele cu reglaj sub sarcină); dispozitivul de acţionare a comutatorului de reglaj (la transformatoarele cu reglaj sub sarcină); termometrul cu cadran (manometric) prevăzut cu contacte reglabile de alarmă, eticheta cu date tehnice şi schema de conexiuni, filtrul de aer (fig. 2.20) umplut cu silicagel (ionosil) de culoare slab albastru (cînd silicagelul absoarbe umiditate, devine roşu, apoi roz şi cînd este saturat cu apă devine incolor, în care caz silicagelul trebuie înlocuit sau regenerat; regenerarea trebuie făcută într-un recipient încălzit la temperatura de 150—200°C, nu peste 300°C); cablajul circuitelor de protecţie; cutia de cabluri a circuitelor auxiliare; urechile sau dispozitivele de ridicat ale transformatorului, bornele de legare la pămînt plasate de obicei pe cărucior; piesele de blocare a roţilor.

Dispunerea pe transformator a elementelor descrise se poate vedea în fig. 2.21.

Circuitele de măsură, protecţie şi control; transformatoarele sînt prevăzute cu următoarele circuite auxiliare: circuitul de control al nivelului maxim şi minim al uleiului din conservator, legat la indicatorul magnetic

Scanned with OKEN Scanner

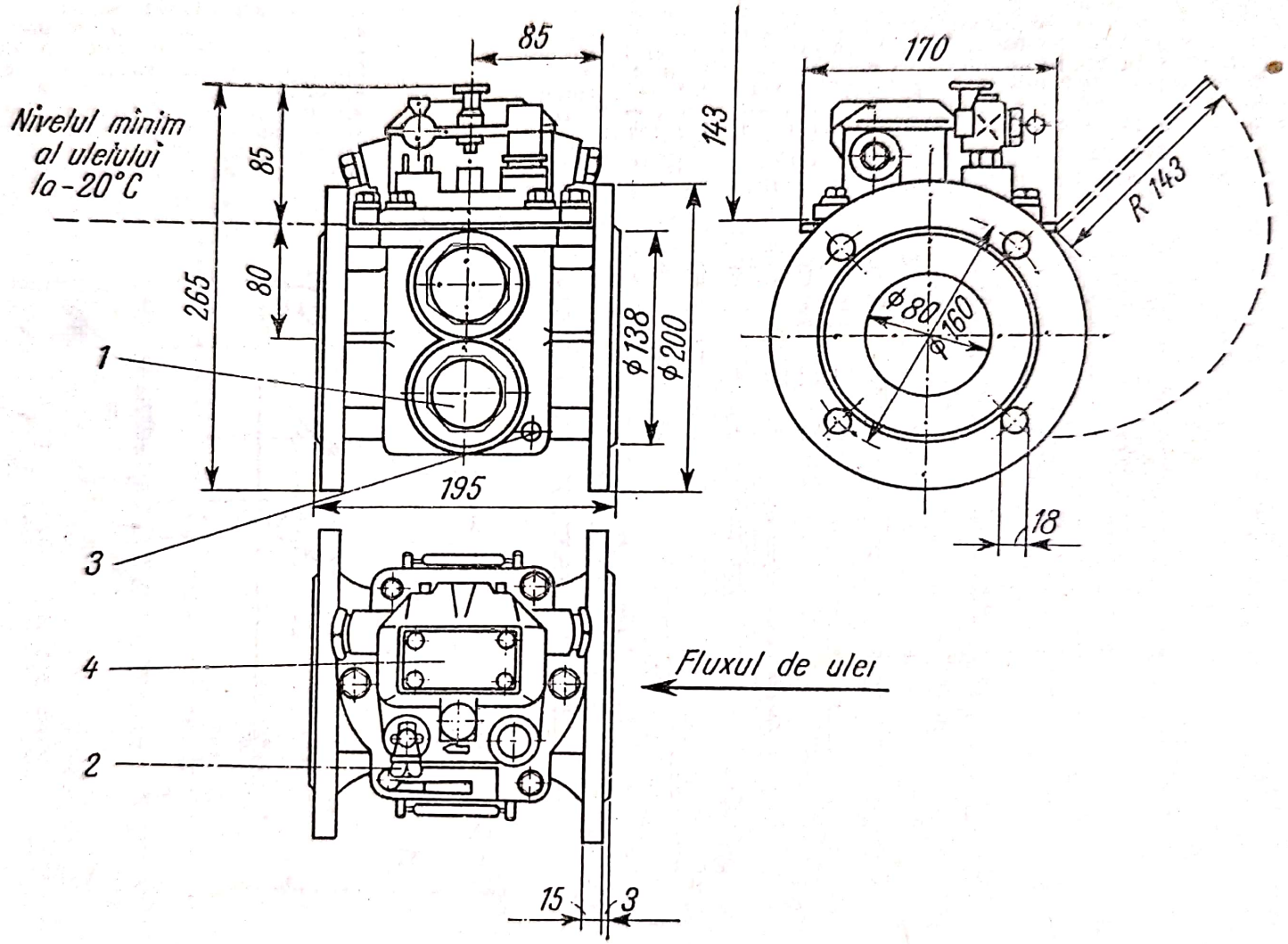


Fig. 2.19. Releu de gaze (Buchholz):

1 — flotoarele şi vizoarele pentru verificarea nivelului şi culorii uleiului; *2* — ventil cu robinet pentru evacuarea gazelor şi verificarea flotoarelor; *3* — buşon de curăţire; *4* — cutie de borne cu mufă de racordare.

Tensiunea de alimentare a releului este de 220 V în curent alternativ, sau 24 ... 220 V în curent continuu.

Scanned with OKEN Scanner

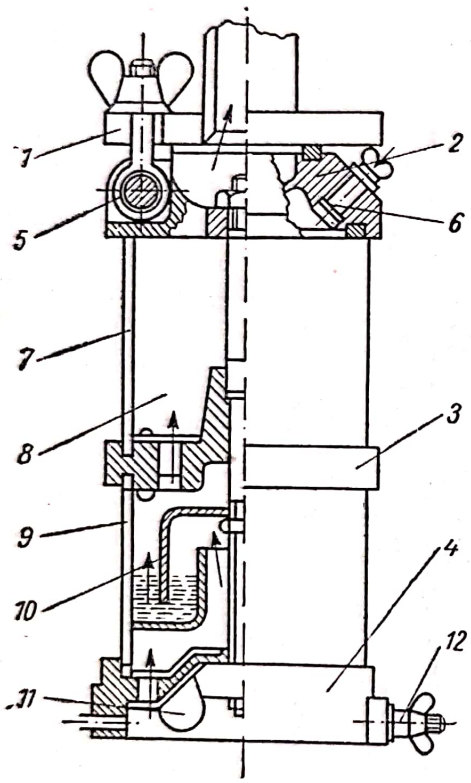


Fig. 2.20. Filtru de aer:

1 — flanșă pentru racordare; *2* — capac superior; *3* — capac intermediar; *4* — capac inferior; *5* — șurub de fixare a filtrului; *6* — orificiu de încercare a etanșeității; *7* — corp de sticlă; *8* — încărcătură de silicagel; *9* — baie de ulei; *10* — pahar; *11* — șurub pentru demontarea băii de ulei; *12* — șurub pentru fixarea filtrului.

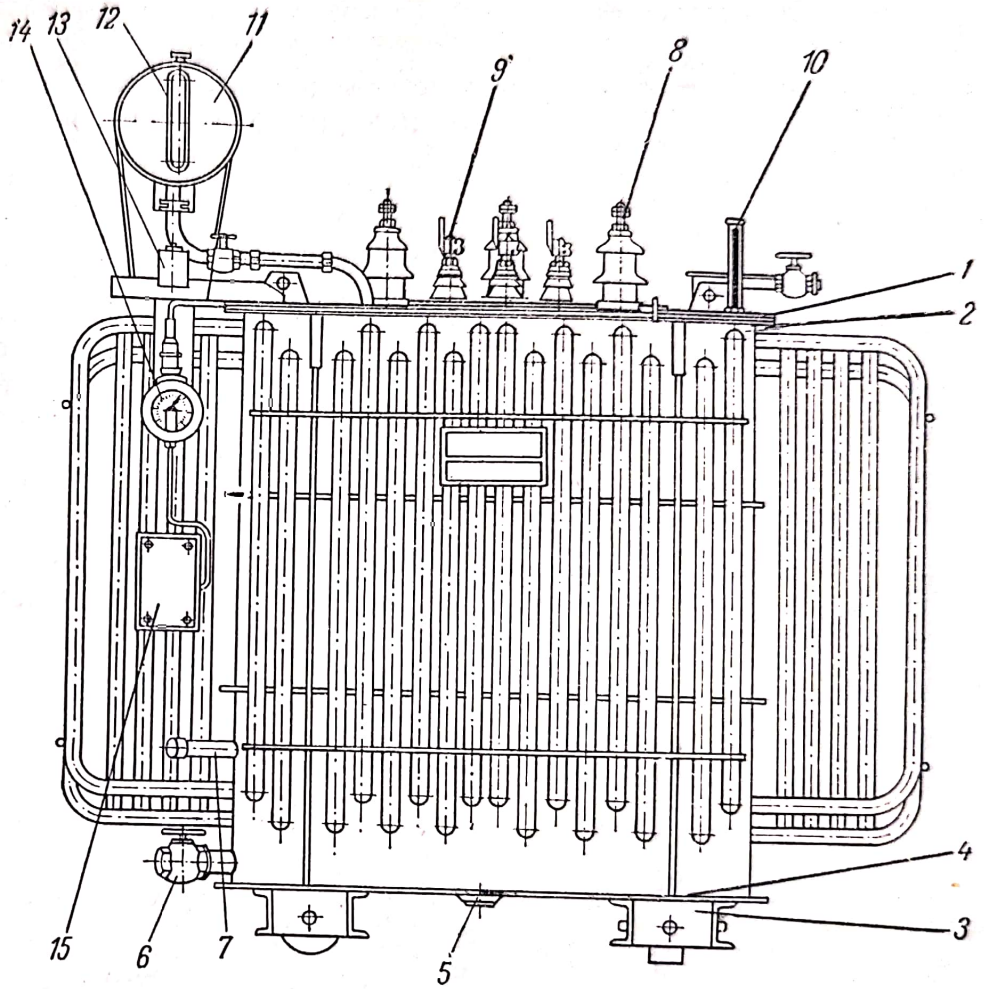


Fig. 2.21. Montarea accesoriilor la un transformator din seria unitară, 1 000 kVA, cu înfășurări din aluminiu:

1 — capac; *2* — cuvă cu radiatoare lră; *3* — cărucior de transport; *4* — bornă de legare la pământ; *5* — buşon pentu curățirea cuvei; *6* — robinet de golire; *7* — buşon pentru luarea probelor de ulei; *8, 9* — izolatoare; *10* — termometru cu mercur; *11* — conservator; *12* — nivelă de ulei; *13* — filtru de aer; *14* — termometru cu contacte; *15* — cutie de borne.

Scanned with OKEN Scanner

de nivel, cu două contacte de alarmă; circuitul de alarmă pentru creșterea excesivă a temperaturii uleiului din cuvă (termometrul cu cadran și două contacte de alarmă); circuitul de alarmă al semnalizatorului termic de pericol (numai la comandă); circuitul de protecție a comutatorului de reglaj (numai la transformatoarele cu reglaj sub sarcină); circuitul releului Buchholz prevăzut cu două contacte pentru semnalizare și declanșare; circuitul transformatoarelor de curent la bornele *IT* și *JT* (numai la comandă).

Conexiunile de la instrumentele de măsurat și de protecție la cutia de borne sînt executate cu cabluri rezistente la umezeală, protejate mecanic în tuburi rigide.

Transformatorul se livrează din uzină cu toate circuitele auxiliare complet montate.

Pentru releele Buchholz și RUS—1000, care se livrează împachetate separat și pentru indicatorul magnetic montat pe conservator, bornele trebuie legate conform desenului de conexiuni.

Rezistența izolației între conexiuni și față de masă, măsurată cu un megohmmetru de 2 500 V trebuie să fie de 100 MΩ.

Instalația de comandă a suflajului de aer; la transformatoarele cu răcire naturală a uleiului și cu suflaj de aer (NS) comanda ventilatoarelor electrice poate fi manuală sau automată, în funcție de temperatura uleiului. Temperatura uleiului este supravegheată prin termometre cu contacte. Temperatura la care trebuie conectată manual instalația de suflaj sau temperaturile indicate de termometrele cu cadran la care intră automat în funcție treptele instalației automate, sînt date în foaia cu caracteristici care însoțește orice transformator livrat.

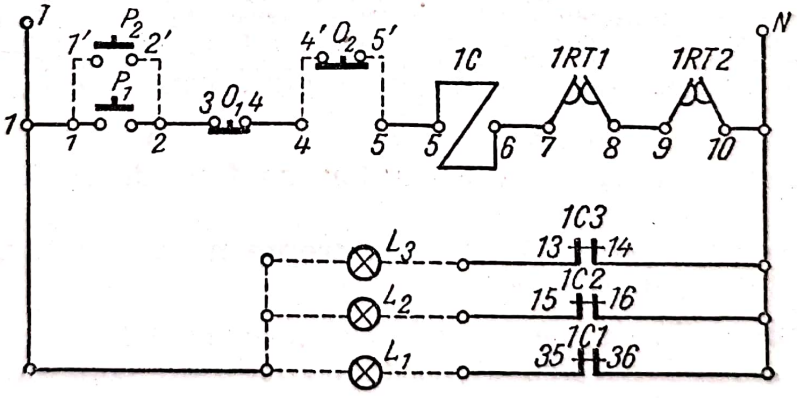


Fig. 2.22. Schema de comandă manuală a suflajului de aer:

1C1, 1C3 — contacte auxiliare ale contactorului de protecție; *1RT1, 1RT2* — relee de protecție cu bimetal; *1C* — bobina de acționare a contactorului; P_1O_1, P_2O_2 — butoane duble de acționare de la distanță; $L_1 \ldots L_3$ — lămpi de semnalizare.

În figurile 2.22 și 2.23 se dau schemele de comandă manuală, respectiv automată.

Clemele și aparatele de comandă sînt montate pe cuva transformatorului într-un cofret special. Pe dosul capacului este dată schema de conexiuni a instalației.

Scanned with OKEN Scanner

Schema manuală de acționare permite introducerea tuturor ventilatoarelor în funcțiune, de obicei în urma unui semnal de alarmă al temperaturii uleiului.

Schema automată în trei trepte permite punerea în funcțiune a treptelor numai începînd cu prima și nu invers.

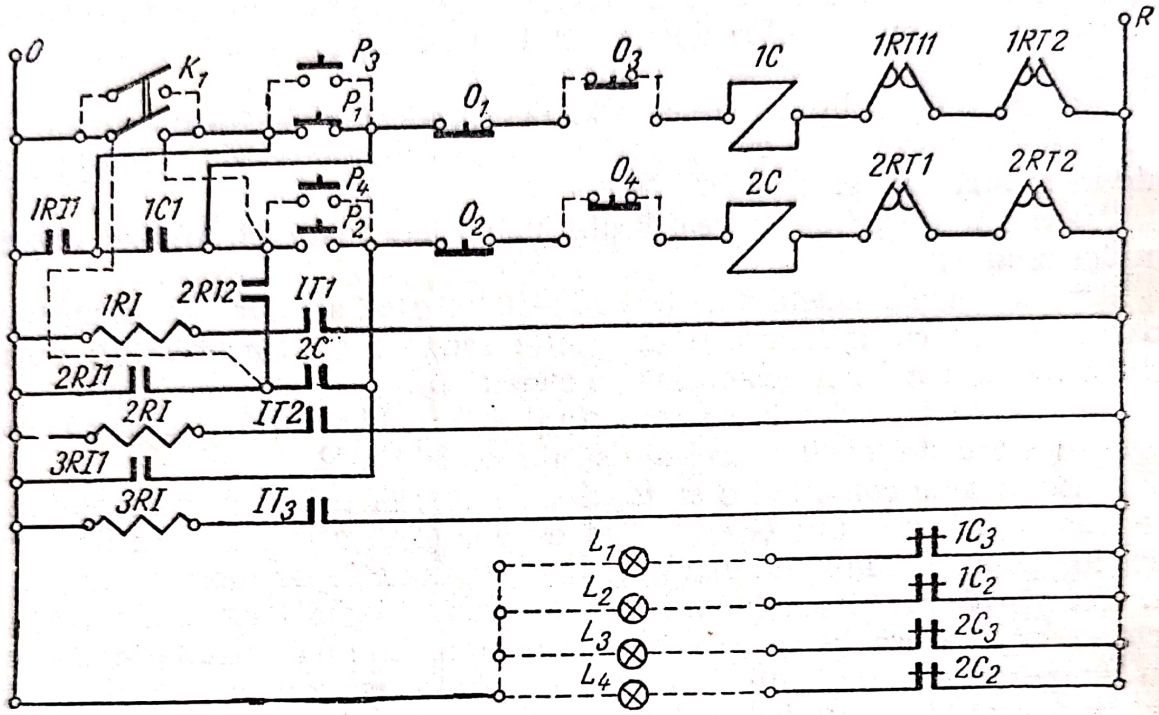


Fig. 2.23. Schema de comandă automată a suflajului de aer:
1T1, 1T3 — contactele termometrului cu cadran; *1C1, 2C3* — contactele auxiliare de protecție ale contactorului; *1RT1, 2RT2* — relee de protecție cu bimetal; *JC, SC* — bobine de acționare ale contactoarelor; $P_4O_1 \ldots P_1O_4$ — butoane duble de acționare de la distanță; K_1 — comutator; $L_1 \ldots L_4$ — lămpi de semnalizare; *1RI..3RI* — bobinele releelor intermediare; *1RT1..3RT1* — contactele releelor intermediare.

Oprirea funcționării ventilatoarelor se face deodată pentru toate treptele.

Dacă la comandă corectă una din trepte nu poate fi pusă în funcțiune, nu pot fi decît două cauze:

a lucrat protecția de suprasarcină și a declanșat releul termic;

contactul normal deschis al contactorului sau contactul normal închis al butoanelor de la treapta respectivă sînt defecte.

Dacă a funcționat protecția, se verifică cauzele suprasarcinii (eventual blocarea ventilatoarelor); se înlătură, se reanclanșează releul termic și se verifică funcționarea corectă a schemei.

2.4.2. Montarea și punerea în funcțiune a transformatorului [65—68]

La transformatoare și în special la transformatoarele mari, montajul în stația de transformare și pregătirea în vederea conectării la rețea constituie probleme de prim ordin pentru specialiștii însărcinați cu această

problemă, fie în cazul unui transformator nou, fie pentru un transformator ieşit dintr-o reparaţie capitală. În cele ce urmează se vor expune problemele care trebuie rezolvate în cazul transformatoarelor din gama 4...25 MVA.

Montajul transformatorului se face în funcţie de posibilităţile existente la locul de montare. În general se pot prezenta următoarele situaţii:

staţia dispune de un turn de decuvare înzestrat cu macara de capacitate corespunzătoare; în acest caz transformatorul este aşezat pe linia de rulare, se montează complet şi apoi prin tractare este adus la locul de funcţionare;

montajul se execută chiar pe locul unde va funcţiona transformatorul; în acest caz se foloseşte fie o macara mobilă, fie schele din traverse de lemn şi cricuri.

În ambele situaţii ordinea de montaj este următoarea:

Montarea căruciorului. Se descarcă corpul principal al transformatorului de pe platforma vagonului.

Se trece la montarea casetelor roţilor, ridicînd cuva cu cricurile (folosind umerii prevăzuţi pentru aceasta).

Se verifică dacă ungătoarele axelor roţilor au vaselină.

Se strînge fiecare ungător presînd vaselină între ax şi roată pentru a se evita ruginirea şi griparea roţii.

Se introduc casetele roţilor în locaşurile prevăzute la cărucior şi apoi se strîng şuruburile de fixare.

Se amplasează transformatorul la locul definitiv de funcţionare.

Se asigură o înclinare a transformatorului de 2—3° (partea conservatorului trebuie să fie mai ridicată). Înclinarea se obţine prin însăşi construcţia platformei sau introducînd adaosuri speciale sub roţi. Se calează roţile transformatorului.

Montarea radiatoarelor. Înainte de montare, radiatoarele trebuie controlate la suduri şi la garnituri. Dacă se semnalează deteriorări cauzate de transport, acestea se repară.

Se spală radiatoarele cu ulei pentru înlăturarea impurităţilor apărute în timpul depozitării.

Se verifică poziţia închisă a clapetelor de obturare a racordurilor la cuvă şi se înlătură, la montarea fiecărui radiator, flanşele oarbe de la cuvă şi de la radiator. Se pun garniturile de cauciuc respective.

Se prinde fiecare radiator în macara şi se montează, urmărindu-se introducerea simultană în prezoane a flanşelor superioare şi inferioare şi se strîng piuliţele, asigurîndu-se etanşeitatea.

Se consolidează radiatoarele cu ajutorul pieselor special prevăzute.

Dacă există, se montează ventilatoarele de suflaj şi se fac legăturile electrice respective.

Umplerea radiatoarelor cu ulei se face după montarea completă a transformatorului.

Montarea conservatorului şi accesoriilor sale. Se spală conservatorul la interior cu ulei.

Scanned with OKEN Scanner

Dacă indicatorul magnetic al nivelului uleiului a fost demontat, se montează fixînd în prealabil flotorul acestuia în poziţia indicată de uzina constructoare la reglarea lui.

Se montează suporturile conservatorului.

Se prinde conservatorul de urechi, se ridică în macara şi se montează cu buloane pe capac.

Se pregătesc pentru montaj releul Buchholz, deblocîndu-i-se flotoarele, şi releul RUS-1 000, deblocîndu-i-se contactele.

Se montează racordul conservator-releu Buchholz — cuvă, racordul conservator — releu RUS-1 000 — comutator şi racordul sistemului de aerisire.

La toate aceste operaţii se va da o mare atenţie etanşeităţii.

Montarea izolatoarelor. Izolatoarele pînă la 35 kV au borne rigide montate pe capac cu ajutorul unor cleme şi piuliţe de strîngere pe bolţurile flanşei (uneori clemele sînt înlocuite cu coliere semicirculare din siluminiu). Între suprafaţa izolatorului şi clemele de strîngere sau coliere se pun bucăţi de tablă de aluminiu pentru a preveni spargerea porţelanului. La montaj se va avea în vedere obţinerea etanşeităţii. La aceste izolatoare, legătura la bornă se face prin fereastra specială de vizitare, introducînd papucul legăturii pe bornă şi fixîndu-l cu piuliţă.

Fixarea pe capac a izolatoarelor tip condensator de la 24 kV în sus, se face folosind flanşa acestora, cu ajutorul piuliţelor sau al şuruburilor filetate pînă sub cap. Înainte de fixarea acestora, se asigură printr-un mijloc oarecare (cablu subţire, sfoară etc.), posibilitatea de a trage ulterior, prin gaura izolatorului, conductorul flexibil. Apoi se fixează fiecare izolator pe capac şi se fac legăturile la borne.

Montarea accesoriilor de pe cuvă şi capac. Se verifică dacă este intactă membrana supapei de siguranţă, se spală întreaga supapă la interior cu ulei şi se montează pe capac, făcîndu-se legătura cu conservatorul.

Se demontează legătura filtrului de aer făcută la capac (la flanşa supapei de siguranţă) şi se montează filtrul la locul lui pe cuvă, făcîndu-i-se legătura cu conservatorul şi asigurînd etanşeitatea.

Se verifică starea silicagelului, eventual se înlocuieşte cu unul proaspăt, deshidratat. Se verifică starea şi cantitatea uleiului din baia filtrului, completîndu-l sau eventual înlocuindu-l.

Pentru montarea termometrului manometric se înşurubează elementul de măsură în locaşul de pe capac, se întinde tubul capilar şi se aşază cadranul termometrului pe suport.

Se montează, dacă există, semnalizatorul termic în locaşul prevăzut pe capac.

La fel se montează şi termometrul cu mercur împreună cu teaca sa.

Se face punerea la pămînt a transformatorului.

Montarea circuitelor auxiliare de protecţie şi măsurare. Circuitele auxiliare sînt montate pe transformator în tuburi de protecţie încă din uzină. La locul de montaj se va verifica continuitatea lor şi se vor face legăturile la aparatele respective, conform schemei circuitelor auxiliare.

În final se vor face probe de funcţionare a circuitelor.

Scanned with OKEN Scanner

Tot atunci se verifică circuitele instalației de comandă a suflajului de aer, dacă acestea există. Se va verifica în special dacă releele termice nu au declanșat cumva datorită trepidațiilor din timpul transportului sau dacă nu s-au dereglat.

Umplerea cu ulei. Se verifică rigiditatea dielectrică a uleiului din cuvă. Dacă valoarea ei este sub 80% din valoarea prescrisă, este necesară regenerarea uleiului în circuit închis, cu o instalație de filtrare și regenerare a uleiului.

Se verifică rigiditatea dielectrică a uleiului de completare din butoaie și se procedează ca mai sus.

Dacă uleiul este corespunzător, se trece la umplerea cu ulei a transformatorului prin racordarea pompei de ulei la robinetul de golire din partea de jos a cuvei.

Pentru umplerea unui radiator se deschide numai clapeta din partea de jos a acestuia și bușonul de aerisire din partea lui superioară. Atunci cînd radiatorul este aproape umplut, se deschide și clapeta din partea superioară.

Umplerea completă a radiatorului cu ulei este semnalată de apariția uleiului la bușonul de aerisire. În acest moment bușonul se închide. Se procedează la fel pentru fiecare radiator, avînd grijă ca să se pompeze ulei în continuare, pentru ca nivelul uleiului din cuvă să nu scadă.

După ce s-au umplut radiatoarele, se deschide robinetul dinspre conservator și se continuă umplerea pînă cînd indicatorul de nivel arată poziția *plin*.

Pregătirea pentru punerea în funcțiune a transformatorului. Transformatoarele se supun la o serie de probe și verificări înainte de punerea în funcțiune. Scopul acestor probe este de a asigura funcționarea corectă și fără avarii.

Un trasformator este pus în funcțiune și supus probelor în acest scop fie la prima utilizare (transformator nou), fie după reparații capitale sau reparații curente sau accidentale urmate de decuvare.

Programul acestor probe, după normele nr. 3E-1-67 elaborate de Ministerul Energiei Electrice este următorul:

proba funcționării mecanice a comutatorului de ploturi;

proba uleiului conform condițiilor din tabelul 2.12;

măsurarea tangentei unghiului δ la izolatoare (se efectuează numai pentru unități foarte mari și tensiuni peste 6 kV și numai în cazul unei staționări îndelungate);

măsurarea rezistenței de izolație a buloanelor de strîngere, accesibile în cazul cînd se scoate miezul (proba se execută numai la transformatoarele reparate capital);

verificarea releului de gaze și a înclinării conductei de legătură dintre transformator și conservator, precum și înclinarea transformatorului;

proba instalației de răcire;

verificarea integrității legăturilor la pămînt a jugului de presare, a circuitului magnetic și cuvei transformatorului;

măsurarea rezistenței de izolație și a coeficientului de absorbție a înfășurărilor;

Scanned with OKEN Scanner

proba pentru determinarea umidității izolației transformatorului;

proba cu tensiune mărită (aplicată sau indusă) a izolației fiecărei înfășurări față de celelalte și față de masă, la transformatoare pînă la 35 kV;

măsurarea în curent continuu a rezistențelor înfășurărilor, pe fiecare plot;

proba pentru determinarea raportului de transformare;

proba pentru determinarea grupei de conexiuni;

încercarea instalațiilor de protecție prin relee;

probele pentru determinarea corespondenței fazelor între transformator și restul instalației;

verificarea individuală a aparatelor anexă din circuitele primare și secundare ale transformatorului;

probele de funcționare în ansamblu a instalațiilor anexe;

probarea comenzilor și blocajelor pentru toate întreruptoarele și separatoarele aferente transformatorului;

verificarea acționării elementelor de protecție asupra intreruptoarelor și semnalizărilor respective;

verificarea instalației de răcire (ventilatoare, pompe de ulei etc.);

verificarea funcționării comutatorului de ploturi și a circuitelor aferente;

verificarea protecțiilor pe instalația montată;

conectarea transformatorului la tensiune nominală timp de 30 minute și efectuarea a 3...5 conectări și deconectări, pentru verificarea comportării;

revizia exterioară a transformatorului în stare caldă după conectarea la rețea (etanșeitatea cuvei), starea garniturilor, radiatoare, clapete etc.;

analiza buletinelor aferente transformatorului și instalațiilor care-l deservesc (aparataj de comandă, protecție, semnalizare, comutator de ploturi, instalație de răcire, ulei etc.) din punctul de vedere al încadrării în normele în vigoare;

verificarea realizării corecte a întregii instalații electrice din punctul de vedere al respectării normelor de tehnica securității muncii și paza contra incendiilor;

verificarea indicațiilor instrumentelor de măsurat;

ridicarea caracteristicii de funcționare în scurtcircuit și măsurarea pierderilor de scurtcircuit;

ridicarea caracteristicii de funcționare în gol și măsurarea pierderilor de funcționare în gol;

efectuarea încercării izolației cu tensiune indusă (dacă este posibilă);

încercarea complexă de 72 ore în gol.

După conectarea transformatorului în sarcină, unitatea care-l exploatează trebuie să înregistreze zilnic încărcarea cu putere activă și reactivă și temperatura uleiului din cuvă, elemente care sînt esențiale pentru evitarea unor avarii care ar putea să fie grave.

Probele preliminare arătate se efectuează după cum urmează:

— încercarea uleiului din cuvă și din izolatoarele de trecere trebuie realizată conform datelor din tabelul 2.12.

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 2.12

Încercarea uleiurilor electroizolante

<table>
<tr><th>Nr. crt.</th><th>Denumirea probei</th><th>Condiţiile probei</th></tr>
<tr><td>1</td><td>Determinarea rigidităţii dielectrice a uleiului. Probă uscată în laborator</td><td>Proba se execută conform STAS 286-63 şi uleiul trebuie să reziste la următoarele tensiuni de străpungere (conform RET-66)
<table>
<tr><th rowspan="2">Rigiditate dielectrică kV/cm</th><th colspan="3">Ulei transformator kV</th><th colspan="2">Ulei de întreruptor kV</th></tr>
<tr><th>pînă la 20 inclusiv</th><th>pînă la 110</th><th>220 şi peste</th><th>pînă la 20 inclusiv</th><th>peste 20</th></tr>
<tr><td>Ulei proaspăt înainte de umplere</td><td>150</td><td>180</td><td>200</td><td>150</td><td>180</td></tr>
<tr><td>Idem, după umplere</td><td>120</td><td>140</td><td>160</td><td>120</td><td>130</td></tr>
<tr><td>Ulei de exploatare</td><td>80</td><td>120</td><td>140</td><td>80*)</td><td>100</td></tr>
</table>
*) se admite şi pentru întreruptoare pînă la 35 kV inclusiv.</td></tr>
<tr><td>2</td><td>Determinarea densităţii relative la 20°C</td><td>Proba se execută conform STAS 35-73. Valoarea densităţii relative la 20°C nu trebuie să depăşească 0,885—0,890 (conform STAS 811-72 şi RET-66).</td></tr>
<tr><td>3</td><td>Determinarea punctului de inflamabilitate</td><td>Proba se execută conform STAS 5489-56. Valoarea admisă este:
— pentru ulei de transformator — minimum 140° (conform RET-66);
— pentru ulei de întreruptor — minimum 135°C.</td></tr>
<tr><td>4</td><td>Determinarea viscozităţii la 20°C (în °E)</td><td>Proba se execută conform STAS 117-66.
Valoarea vîscozităţii este:
— pentru ulei nou 4,5°E (conform STAS 811-72);
— pentru ulei de exploatare la transformatoare pînă la 1 000 kVA maximum 5°E (conform RET-66);
— aceleaşi valori, la transformatoare de 1 000 kVA şi mai mari;
— maximum 4,5°E (conform RET-66);
— pentru întreruptoare, maxim 5,5°E.</td></tr>
<tr><td>5</td><td>Determinarea acidităţii organice şi minerale</td><td>Indicele de aciditate se determină conform STAS 23-68.
Pentru ulei din exploatare valoarea indicelui de aciditate nu trebuie să depăşească:
0,05 mg KOH/g, la transformatoare pînă la 1 000 kVA,
0,03 mg KOH/g, la transformatoare de 1 000 kVA şi mai mari.
Aciditatea minerală se determină conform STAS 22-64.
Uleiul nu trebuie să prezinte aciditate minerală (conform STAS 811-72).</td></tr>
</table>

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 2.12 (continuare)

Nr. crt.	Denumirea probei	Condițiile probei
6	Determinarea alcalinității	Proba se execută conform STAS 22-64. Reacția extrasului apos trebuie să fie neutră (conform STAS 811-72 și RET-66).
7	Determinarea conținutului de cenușă	Proba se execută conform STAS 38-73. Procentul de cenușă în ulei nu trebuie să depășească 0,004% (conform STAS 811-72).
8	Determinarea impurităților mecanice	Proba se execută conform STAS 33-71. Nu trebuie să existe impurități mecanice în uleiul nou.
9	Determinarea transparenței la +5°C	Proba se execută conform STAS 811-72. Uleiul răcit la +5°C trebuie să fie perfect transparent
10	Determinarea stabilității la oxidare	Se execută îmbătrînirea artificială a uleiului conform STAS 6798-63 și se determină în % din gudroane conform STAS 118-68 precum și indicele de aciditate conform STAS 23-68. Aceste valori nu trebuie să depășească (conform STAS 811-72): gudroane — maximum 0,10%; aciditate — maximum 0,35 mg KOH/g;
11	Determinarea punctului de anilină	Proba se execută conform STAS 178-49. La transformatoare punctul de anilină este de 70°C
12	Determinarea punctului de congelare	Proba se execută conform STAS 39-56. Punctul de congelare este de: — 40°C, (conform STAS 811-72 și RET-66).
13	Probă natron	Proba se execută conform STAS 30-51. Uleiul trebuie să corespundă caracterelor nr. 2.
14	Determinarea tangentei unghiului de pierderi dielectrice (tg δ)	Proba se execută conform STAS 2740-69. Valorile admisibile (conform RET-66) sînt:

Pierderi dielectrice (%) tg δ	Temperatură °C +20	+70
Ulei nou: (valori maxime)		
— înainte de umplere	0,7	2,5
— după umplere	1	3

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 2.12 (continuare)

Nr. crt.	Denumirea probei	Condițiile probei		
		Pierderi dielectrice (%) tg δ	Temperatură °C +20	+70
		Ulei de exploatare:		
		— pentru transformatoare pînă la 1 000 kVA	4	10
		— aceleași valori pentru transformatoare de 1 000 kVA și mai mari	2	7
		— pentru reîncărcarea transformatorului reparat	1	4
		Observație. În cazurile în care există date ale fabricii furnizoare privind uleiurile la anumite utilaje, rezultatele măsurării se vor compara cu datele fabricii.		
15	Determinarea conținutului de apă depusă	Proba se execută conform STAS 24-72. Uleiul nu trebuie să depună apă		
16	Determinarea conținutului în suspensie	Proba se execută prin crepitare (pocnituri) la încălzirea uleiului în eprubetă. Uleiul nu trebuie să aibă apă în suspensie		
17	Determinarea conținutului de apă de compoziție	Uleiul nu trebuie să aibă apă de compoziție		
18	Reacția extrasului apos	Reacția trebuie să fie neutră		
19	Verificarea mirosului	La temperatura de 80°C uleiul nu trebuie să aibă miros înțepător.		
20	Verificarea aspectului	Se verifică vizual. Aspectul trebuie să fie clar și limpede		

Observații (conform RET-66). Uleiul din exploatare trebuie supus recondiționării fizice dacă are apă, cărbune în suspensie, impurități mecanice sau rigiditate dielectrică sub limitele prescrise, sau dacă apare aciditate minerală.

Regenerarea chimică se impune atunci cînd aciditatea organică sau pierderile dielectrice depășesc valorile normale.

Uleiul trebuie casat atunci cînd nu corespunde ca punct de inflamabilitate, densitate sau punct de congelare.

Uleiul regenerat chimic trebuie să aibă aceleași calități ca și uleiul nou.

Miscibilitatea uleiurilor noi sau în exploatare se va stabili în baza rezultatelor obținute la determinarea indicilor caracteristici pentru stabilitate chimică și anume: pierderi dielectrice, punct de anilină și indice de refracție.

Uleiul din transformatoare avînd o putere de 1 800 kVA și mai mare, de orice tensiune, trebuie recondiționat preventiv, periodic sau permanent, în timpul exploatării, conform precizărilor din instrucțiunile tehnice.

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 2.12 (continuare)

Uleiul nou aflat în rezervă trebuie supus unei analize reduse o dată pe an şi unui control curent de două ori pe an.

Uleiul din exploatare se supune următoarelor încercări:

a) uleiul din transformatoare şi aparate cu tensiuni pînă la 10 kV inclusiv — o dată la 3 ani *o analiză redusă;*

b) uleiul din transformatoare şi aparate cu tensiuni de la 10—35 kV inclusiv — o dată pe an un control curent şi o dată la 3 ani *o analiză redusă;*

c) uleiul din transformatoare şi aparate cu tensiuni peste 35 kV — o dată pe an *un control* şi *o analiză redusă;*

d) uleiul din transformatoare capsulate — o dată la 2 ani *un control curent;*

e) uleiul din izolatoare de trecere — o dată pe an o *analiză redusă;*

f) uleiul din transformatoare şi aparate, după reparaţii capitale — *o analiză redusă;*

g) uleiul din întreruptoare după întreruperea consecutivă a patru scurtcircuite — *o analiză redusă.*

Controlul curent cuprinde următoarele determinări: rigiditatea dielectrică, pierderile dielectrice, aspectul, mirosul, conţinutul de apă. Primele două determinări sînt cantitative, celelalte calitative.

Analiza redusă, pe lîngă determinările prevăzute de controlul curent, mai cuprinde următoarele determinări: culoarea, punctul de inflamabilitate, viscozitate, indicele de aciditate, extracţia extrasului apos, impurităţile mecanice, conţinutul de cărbune, punctul de anilină, punctul de congelare.

Analiza completă, pe lîngă determinările prevăzute la analiza redusă, cuprinde şi următoarele determinări: greutatea specifică la 20°C, cenuşa, indicele de refracţie, prezenţa sau lipsa inhibitorilor (cromatografic) şi stabilitatea chimică, după STAS 6798-63.

● Măsurarea rezistenţei de izolaţie a înfăşurărilor transformatorului sau autotransformatorului şi a coeficientului de absorbţie (R_{60}/R_{15})* se efectuează:

— cu megohmmetrul de 1 000 V la înfăşurări cu tensiunea nominală $U_n < 400$ V;

— cu megohmmetrul de 2 500 V la înfăşurări cu tensiunea nominală $U_n > 400$ V.

Valoarea rezistenţei de izolaţie nu este normată. Rezultatele măsurării se compară cu datele din fabrică sau cu măsurări anterioare. La punerea în funcţiune, rezistenţa de izolaţie R_{60} trebuie să fie de cel puţin 70% din valoarea din fabrică, raportată la temperatura respectivă. Coeficientul de variaţie a rezistenţei de izolaţie K în funcţie de diferenţa de temperatură Δt este:

Δt, °C	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
K	1,2	1,5	1,8	2,3	2,8	3,4	4,1	5,0	6,1	7,3

* R_{15} şi R_{60} sînt rezistenţele de izolaţie faţă de masă a fiecărei înfăşurări primare şi secundare precum şi între înfăşurări, măsurate cu megohmmetrul de 1 000—2 500 V după 15 respectiv 60 secunde. Măsurarea rezistenţei de izolaţie cu megohmmetrul se efectuează în decurs de un minut, rotind uniform manivela acestuia cu viteza de aproximativ 120 rot/min. Se citeşte indicaţia megohmmetrului după 15 şi după 60 secunde şi se obţine R_{15} respectiv R_{60}. Temperatura la care se face măsurarea trebuie să fie minimum 10°C.

Scanned with OKEN Scanner

După o reparație curată, verificare periodică sau decuvare, rezistența de izolație minimă admisă este 70% din valoarea inițială.

Dacă lipsesc datele din fabrică sau inițiale, se dau orientativ următoarele valori ale rezistenței de izolație, în MΩ:

Caracteristicile transformatorului	Temperatura izolației, °C						
	10	20	30	40	50	60	70
Pînă la 35 kV și 7,5 MVA, inclusiv	450	300	200	130	90	60	40
Peste 35 kV și 7,5 MVA și pentru 110 kV (indiferent de putere)	900	600	400	260	180	120	80

La transformatoarele sub 1 000 kVA, pentru înfășurarea de joasă tensiune, în cazul că nu există date din fabrică sau anterioare, valoarea minimă a rezistenței de izolație se ia 2 MΩ între 10 și 30°C.

Coeficientul de absorbție, orientativ trebuie să fie:

$$\frac{R_{60}}{R_{15}} \geqslant 1{,}3$$

și folosește la stabilirea necesității uscării, înfășurării sau înlocuirii uleiului.

● Măsurarea tangentei unghiului de pierderi dielectrice (tg δ) a izolației înfășurării (probă facultativă la transformatoare avînd $P_{nom} < 10$ MVA) trebuie să conducă la valori pentru tg δ care să nu depășească cu mai mult de 30% valoarea dată de fabrică.

Coeficientul de variație a pierderilor dielectrice în funcție de diferența de temperatură este:

Δt, °C	10	15	20	25	30	35	40	45	50
K_δ	1,3	1,5	1,7	1,9	2,2	2,5	3,0	3,6	4,4

Valori orientative pentru 100 tg δ în funcție de temperatură sînt cuprinse în tabelul care urmează:

Caracteristicile transformatorului	Temperatura izolației, °C						
	10	20	30	40	50	60	70
Pînă la 35 kV și 2,5 MVA inclusiv	1,5	2	2,6	3,4	4,6	6	8
Pînă la 35 kV și 10 MVA inclusiv	1,2	1,5	2	2,6	3,4	4,5	6
Peste 35 kV și 10 MVA și pentru 110 kV, indiferent de putere	0,8	1	1,3	1,7	2,3	3	4

Scanned with OKEN Scanner

● Măsurarea raportului C_2/C_{50}* (probă facultativă la transformatoare avînd $P_n<10$ MVA) are drept scop să verifice dacă valoarea raportului nu depășesc cu mai mult de 10% valorile de fabrică sau pe cele măsurate la punerea în funcțiune. Se dau următoarele valori orientative în funcție de temperatură, pentru C_2/C_{50}:

Caracteristicile transformatorului	Temperatura izolației °C		
	10	20	30
Pînă la 35 kV și 7,5 MVA inclusiv	1,1	1,2	1,3
Peste 35 kV și 7,5 MVA și pentru 110 kV, indiferent de putere	1,05	1,15	1,25

● Măsurarea capacității înfășurărilor transformatorului (raportul C_{70}/C_{20}** — probă facultativă) impune determinarea capacității la două temperaturi ale transformatorului, avînd cel puțin 50°C diferență; temperatura superioară va fi minimum 70°C. Raportul dintre capacitatea la 70°C și cea la 20°C trebuie să fie mai mic decît 1,3.

● Măsurarea tangentei unghiului de pierderi dielectrice și a capacității izolatoarelor de trecere cu ulei trebuie să conducă la rezultate care să corespundă cu valorile indicate de fabrică.

● Încercarea izolației înfășurărilor cu tensiune alternativă mărită și 50 Hz (proba facultativă la $U_n>35$ kV) se execută numai la transformatoare avînd înfășurările cu izolație uniformă (plină), verificîndu-se izolația uneia din înfășurări față de masă și față de celelalte înfășurări legate la masă. Transformatorul va fi de preferință în stare caldă.

Comutatorul de ploturi se pune pe poziția nominală.

Valorile tensiunilor de încercare vor fi (în kV):

Tensiunea nominală a înfășurări	1	3	6	10	15	20	30	35	60	110	220
Valori de încercare conform STAS	5	16	22	28	38	50	70	80	140	230	460
Valori de încercare la punere în funcțiune	3,75	12	16,5	21	28,5	37,5	52,5	60	105	172	345
Valori de încercare după rebobinarea înfășurării	4,25	13,6	18,7	23,8	32,3	42,5	59,5	68	119	195	391

* C_2; C_{50} sînt capacitățile înfășurărilor transformatorului în cazul alimentării cu o tensiune de frecvență 2 respectiv 50 Hz. Înfășurarea primară constituie o armătură, iar înfășurarea secundară a doua armătură. De obicei se măsoară direct raportul $\frac{C_2}{C_{50}}$ cu un instrument special construit în acest scop. Temperatura ambiantă la care se efectuează măsurarea trebuie să fie de minimum 10°C.

** Capacitatea la 50 Hz și la temperatura înfășurărilor de 70°C respectiv 20°C.

Scanned with OKEN Scanner

Durata de menținere a tensiunii de încercare este de 1 minut pentru fiecare înfășurare; încercarea se va face numai dacă rezultatele de la probele precedente au fost concludente.

● Încercarea izolației înfășurării cu tensiune alternativă mărită indusă se efectuează la transformatoare avînd înfășurări cu izolație degresivă și la transformatoare cu izolație plină, avînd tensiunea nominală a înfășurărilor peste 35 kV.

Valorile tensiunilor de încercare sînt:

U_n rețea, kV	110	220	380
$U_{încercare}$, kV	140	280	480

Durata de menținere a tensiunii de încercare este de 1 minut; încercarea se va face numai dacă rezultatele probelor de la punctele precedente au fost concludente.

Comutatorul de ploturi se pune pe poziția care închide toate înfășurările.

● Încercarea izolației înfășurării cu tensiune alternativă mărită, de frecvență 100—400 Hz (probă facultativă) se realizează cu o valoare a tensiunii de încercare $U_{înc} \geqslant 2U_n$ în cazul înfășurărilor cu izolație plină, aplicată de preferință la înfășurarea de joasă tensiune, cea de înaltă tensiune fiind în gol.

Se recomandă, cînd există posibilitatea, utilizarea unei frecvențe spre limita superioară (400 Hz).

Durata încercării se calculează cu formula:

$$t_{înc} = 60 \frac{100}{f_{înc}} \geqslant 15 \text{ (secunde)},$$

unde $f_{înc}$ este frecvența de încercare.

● Măsurarea rezistenței înfășurărilor transformatorului sau autotransformatorului se face pentru fiecare înfășurare, pe fiecare fază și pe fiecare priză. La transformatoare avînd neutrul neaccesibil, se vor măsura rezistențele între faze și se vor determina rezistențele pe faze prin calcul.

Rezistențele înfășurărilor diferitelor faze pe același plot, nu trebuie să difere, între ele sau față de datele din fabrică, cu mai mult de 2%.

● Măsurarea raportului de transformare al transformatorului și autotransformatorului, se face pe toate fazele și pe toate prizele transformatorului. Valoarea tensiunii de alimentare trebuie să fie peste 1% față de U_n și pe cît posibil mai apropiată de U_n.

La transformatoarele trifazate, cînd nu se pot măsura tensiunile de fază, se admite verificarea raportului de transformare prin măsurarea tensiunii între faze.

Raportul de transformare măsurat nu trebuie să difere cu mai mult de 0,5% față de cel indicat de fabrică.

● Măsurarea curentului și a pierderilor de funcționare în gol a transformatorului sau autotransformatorului se execută la transformatoare cu

Scanned with OKEN Scanner

$U_n \geqslant 6$ kV şi $P_n \geqslant 10$ MVA, alimentînd de la o sursă trifazată, la tensiunea nominală, înfăşurările primare ale transformatorului pe plotul corespunzător U_n, înfăşurările secundare fiind lăsate în circuit deschis sau invers. Valoarea tensiunii aplicate se consideră media aritmetică a celor trei tensiuni de linie măsurate. Curentul de funcţionare în gol se consideră media aritmetică a valorilor celor trei curenţi de linie. Rezultatele măsurărilor nu se normează. Ele se compară cu datele din fabrică, sau din STAS 440-62. Abaterile admise sînt:

+15% pentru pierderi de funcţionare în gol;

+30% pentru curentul de funcţionare în gol.

● Măsurarea tensiunii de scurtcircuit şi a pierderilor la sarcină nominală ale transformatorului sau autotransformatorului (proba facultativă pentru transformatoare montate în staţii) se execută la transformatoarele cu $P_n > 10$ MVA.

Se alimentează de la o sursă trifazată primarul transformatorului, secundarul fiind conectat direct în scurtcircuit sau invers.

Curentul din înfăşurarea alimentată se consideră media aritmetică a valorilor celor trei curenţi de linie, iar valoarea tensiunii aplicate se determină în mod asemănător.

Rezultatele măsurărilor se compară cu datele din fabrică sau din STAS 440-62. Abaterile admise faţă de datele din fabrică sînt:

+10% pentru pierderi în sarcină cu condiţia ca pierderile totale să nu depăşească +10%;

±10% pentru tensiunea de scurtcircuit la transformatoarele cu două înfăşurări şi

±15% pentru transformatoarele cu înfăşurări comune (autotransformatoare).

● Verificarea transformatorului la conectări şi deconectări repetate se face:

prin conectarea transformatorului la tensiunea nominală, ţinîndu-se 30 minute, timp în care se urmăreşte comportarea transformatorului şi instrumentelor de măsurat;

prin conectarea şi deconectarea transformatorului de trei ori, pentru perioade scurte, urmărindu-se comportarea transformatorului şi aparatelor de protecţie.

● Verificarea etanşeităţii cuvei se face la un surplus de presiune, timp de 15 minute, astfel:

pentru cuve cu ţevi sau cuve netede — 0,6 m coloană de ulei;

pentru cuve ondulate sau cu radiatoare — 0,3 m coloană de ulei;

Surplusul de presiune se obţine prin racordarea la conservator a unei ţevi cu pîlnie umplută cu ulei. În timpul încercării, orificiul ţevii de respiraţie a conservatorului va fi închis. După 12 ore de la umplere se cercetează atît îmbinările sudate ale cuvei cît şi celelalte îmbinări. Nu trebuie să se observe scurgeri de ulei nici la îmbinări, nici la robinetul de golire a băii.

● Verificarea înclinării conductei de legătură între transformator şi conservator şi a capacului transformatorului, trebuie să ducă la conclu-

Scanned with OKEN Scanner

zia că înclinarea în sus a capacului în direcţia releului de gaze, este cel puţin de 1—1,5%.

Conducta de ulei de la transformator spre conservator trebuie să aibă înclinarea de 2—4%.

2.5. EXPLOATAREA ŞI ÎNTREŢINEREA TRANSFORMATOARELOR

2.5.1. Întreţinerea transformatorului înaintea punerii în funcţiune

Înainte de expediere din fabrica constructoare, transformatorul se umple cu ulei pînă la 100 mm sub capac; în acest fel este asigurată posibilitatea de dilatare a uleiului în funcţie de temperatura mediului ambiant. Pentru asigurarea pătrunderii unui aer uscat în transformator, pe timpul transportului, filtrul de aer, umplut cu silicagel, se montează în locul supapei de siguranţă.

Înainte de expedierea din fabrică, toate robinetele transformatorului şi butoaiele cu uleiul pentru completarea cantităţii necesare, se sigilează.

După ajungerea transformatorului la locul de depozitare sau la staţia de transformare, trebuie să i se facă un control general, pentru a se descoperi eventualele defecte apărute în timpul transportului. Tot atunci se verifică starea sigiliilor aplicate pe robinete şi în alte părţi; se va controla dacă nu au apărut scurgeri de ulei în timpul transportului şi se va remedia etanşeitatea dacă este necesar. Se va verifica nivelul uleiului; el trebuie să corespundă nivelului indicat pe conservator (pentru temperatura respectivă) şi se va controla dacă în timpul transportului nu a pătruns ulei în filtrul de aer şi se va înlocui eventual silicagelul. Nu se va demonta nici o piesă, în special capacul conservatorului, chiar dacă transformatorul este depozitat într-un spaţiu acoperit; în acest fel se va evita contactul direct al uleiului cu atmosfera.

2.5.2. Întreţinerea transformatorului după punerea în funcţiune

Pentru ca transformatorul să aibă o durată de funcţionare normală, trebuie respectate în timpul funcţionării sale o serie de reguli care urmăresc împiedicarea îmbătrînirii premature a izolaţiei şi a pătrunderii umidităţii în transformator [68, 69].

Tensiunea reţelei nu trebuie să depăşească cu mai mult de 10% tensiunea prizei pe care funcţionează transformatorul.

Nu este admisă încărcarea permanentă la sarcina nominală a transformatorului, dacă acesta funcţionează într-un mediu în care temperatura ambiantă o depăşeşte pe cea maximă prescrisă.

Scanned with OKEN Scanner

În caz de avarie se admite funcționarea transformatorului la suprasarcinile arătate în tabelul 2.13. La o durată mai mare a suprasarcinii, integritatea transformatorului este pusă în pericol.

Tabelul 2.13

Suprasarcini admisibile la transformatoare

Suprasarcină, %	30	60	75	100	140	200
Durata, minute	120	30	15	7,5	3,5	1,5

În exploatare trebuie verificate periodic:
nivelul și culoarea uleiului din transformator;
temperatura uleiului;
starea silicagelului din filtrul de aer;
starea izolatoarelor;
starea legăturilor la priza de legare la pământ;
starea circuitelor de protecție;
caracterul zgomotului (dacă s-a modificat sau s-a amplificat).

La intervale mai mari (trimestrial sau anual) se verifică:
funcționarea dispozitivului de acționare a comutatorului de reglaj sub sarcină (dacă există);
funcționarea protecției prin releul Buchholz și prin releul RUS 1 000 și a protecției homopolare și diferențiale;
rigiditatea dielectrică a uleiului și rezistența izolației.

Dacă se constată vreo anomalie în funcționarea transformatorului, acesta se scoate de sub tensiune și se verifică cauzele defectului, luîndu-se măsuri de remediere.

2.5.3. Exploatarea uleiului

Condițiile anormale de funcționare a transformatorului sau defectele interioare se răsfrîng încă din faza incipientă asupra uleiului. Prin verificarea uleiului se pot obține indicații prețioase asupra stării transformatorului. Creșterea temperaturii uleiului peste valoarea normală indică o răcire insuficientă sau o suprasarcină; scăderea rapidă a punctului de aprindere a acestuia cu 10 . . . 20°C sau chiar mai mult, este provocată de încălziri locale în transformator (contacte slabe, tole scurtcircuitate la miez etc.). Apariția carbonului în ulei este cauzată de străpungeri sau conturnări în interiorul transformatorului. La rîndul său, uleiul de slabă calitate (cu aciditate și umiditate mărite) provoacă degradarea izolației înfășurărilor.

Din această cauză, un control riguros al uleiului constituie o sarcină foarte importantă în exploatarea transformatorului.

Încercarea uleiului în exploatare se face: înainte de punerea în funcțiune, după aproximativ trei luni de funcționare și apoi din șase în șase luni.

Scanned with OKEN Scanner

Probele de ulei se colectează de la buşoanele prevăzute în acest scop. La luarea probelor, buşoanele vor fi curăţate, iar vasele de luat probe uscate şi clătite de 2 . . . 3 ori cu uleiul de probat. Proba se va lua după ce s-a lăsat să se scurgă liber 1 . . . 2 litri de ulei. Vasele cu uleiul pentru probe se vor astupa imediat, preferabil cu un dop de sticlă (în nici un caz nu se vor folosi dopuri de cauciuc).

Probele transportate pe timp rece nu se vor destupa decît după ce uleiul a luat temperatura încăperii; în caz contrar, în ulei se va condensa umezeala aflată în aer. Se va evita luarea probelor pe timp umed sau friguros.

Atunci cînd i-a scăzut rigiditatea dielectrică sau a căpătat impurităţi, uleiul de transformator trebuie purificat prin filtrare sau centrifugare. Înainte de utilizare se supune probelor.

Uleiurile electroizolante înainte de utilizare şi în special la utilizarea pentru transformatoare, se supun probelor şi trebuie să îndeplinească conditiile din tabelul 2.11, pentru a putea fi considerate corespunzătoare.

2.6. COMPORTAREA IZOLAŢIEI TRANSFORMATOARELOR ÎN EXPLOATARE

Căile de curent ale transformatoarelor trebuie să aibă o izolaţie corespunzătoare spre a evita avarii în funcţionare.

Izolaţia unui transformator cuprinde trei părţi: izolaţia conductorului; izolaţia bobinelor şi izolaţia între înfăşurări, adică între înfăşurarea de înaltă tensiune şi înfăşurarea de joasă tensiune; izolaţia între înfăşurări şi masa transformatorului.

La transformatoarele în ulei, acesta din urmă are atît rolul de izolant cît şi rolul de a asigura răcirea, transportînd căldura din părţile unde se produce dezvoltarea de căldură spre pereţii cuvei, ţevi sau radiatoare, unde are loc cedarea de căldură.

Ca materiale izolante sînt mult folosite în construcţia transformatoarelor hîrtia izolantă, realizată pe bază de celuloză şi uleiul, în care se introduc, în cuvă, bobinele izolate ale înfăşurării.

În continuare se va arăta comportarea în exploatare a izolaţiei unui transformator [83—96].

2.6.1. Comportarea în exploatare a izolaţiei de hîrtie

Comportarea în exploatare a izolaţiei de hîrtie a transformatoarelor este influenţată de două fenomene:

— absorbţia de către hîrtie a apei din ulei, deoarece hîrtia are o mare afinitate pentru apă;

— îmbătrînirea.

Efectul umidităţii asupra izolaţiei de hîrtie a transformatorului, în ceea ce priveşte rigiditatea dielectrică a hîrtiei şi a transformerboardului la 50 Hz, poate fi urmărită pe figurile 2.24, 2.25 şi 2.26.

Scanned with OKEN Scanner

Cercetările au arătat că celuloza, în prezența uleiului saturat cu aer, îmbătrînește de două ori mai repede decît în prezența unui ulei complet fără aer. Din acest motiv este necesar să se ia măsuri care să asigure protejarea uleiului din transformator contra contactului cu aerul. În scopul acesta, transformatorul trebuie uscat sub vid, în mod satisfăcător și umplut cu ulei la o presiune reziduală de aproximativ 0,03 bari.

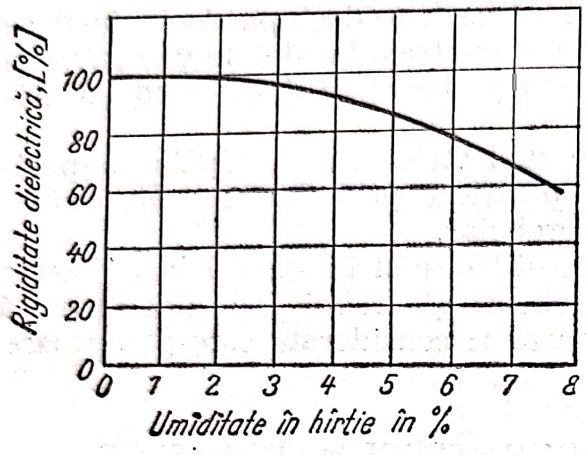


Fig. 2.24. Efectul umidității asupra rigidității dielectrice a hîrtiei impregnate cu ulei.

Este interesant de arătat că datorită îmbătrînirii, proprietățile dielectrice ale hîrtiei și cartoanelor scad în mică măsură, dar proprietățile mecanice se înrăutățesc sensibil.

Materialele izolante pe bază de celuloză preiau o anumită cantitate de umiditate din atmosferă. Uleiul în contact cu atmosfera din conservator, dizolvă lent apa din atmosferă, iar apoi aceasta este absorbită de hîrtia și cartoanele izolației transformatorului.

S-a constatat că, după 10 ani de servici, la un transformator de putere medie sau mare prevăzut cu conservator și aparat cu silicagel, izolația de hîrtie poate conține umiditate în proporție de 3 . . . 5%, iar conținutul inițial de apă din ulei a fost de 0,5%.

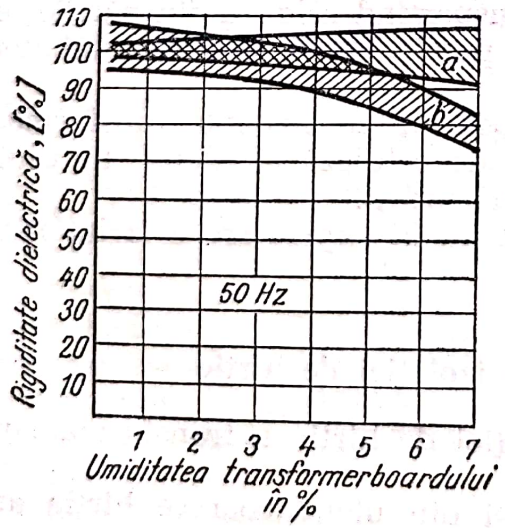


Fig. 2.25. Rigiditatea dielectrică la 50 Hz a transformatorului impregnat cu ulei, la 20°C:
a — conturnare; *b* — străpungere.

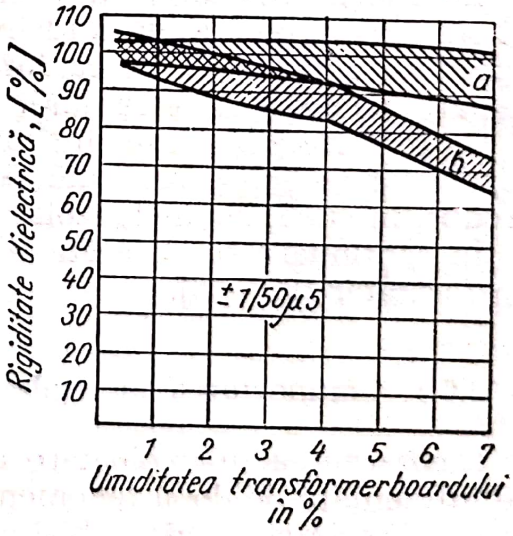


Fig. 2.26. Rigiditatea dielectrică la unde de impuls 1/50 a transformerboardului impregnat cu ulei, la 20°C:
a — conturnare; *b* — străpungere.

Scanned with OKEN Scanner

2.6.2. Comportarea în exploatare a uleiului de transformator

Uleiul de transformator este un amestec de hidrocarburi minerale, iar caracteristicile sale principale se referă la proprietățile mecanice, fizice, chimice și electrice.

● Proprietățile mecanice ale uleiului de transformator, constă în variația volumului uleiului în funcție de doi factori: temperatură și presiune. Dependența de temperatură a volumului de ulei, dă efectul de circulație a uleiului în cuvă utilizat pentru răcire în transformatoarele cu răcire naturală.

Dependența de presiune a volumului de ulei favorizează transmiterea vibrațiilor și deci producerea zgomotului transformatoarelor.

● Proprietățile fizice se referă la viscozitatea cinematică și punctul de inflamabilitate.

● Proprietățile chimice se referă la structura chimică a uleiului și anume: aciditate, saponificare, oxidare etc.

● Proprietățile electrice se referă la tensiunea de străpungere, pierderi dielectrice, rezistivitate electrică.

Deosebit de important este ca uleiul să aibă un grad de aciditate sau oxidare redus.

Caracteristicile principale pentru uleiul de transformator sînt date în tabelul 2.14.

Absorbția umidității. Uleiul mineral absoarbe apa, ceea ce duce la înrăutățirea simțitoare a calităților izolante ale uleiului.

Gradul de solubilitate a apei în ulei variază în funcție de temperatură (tabelul 2.15).

În fig. 2.27 este reprezentată dependența de umiditatea relativă a aerului, a conținutului de apă în ulei, la diferite temperaturi ale aerului.

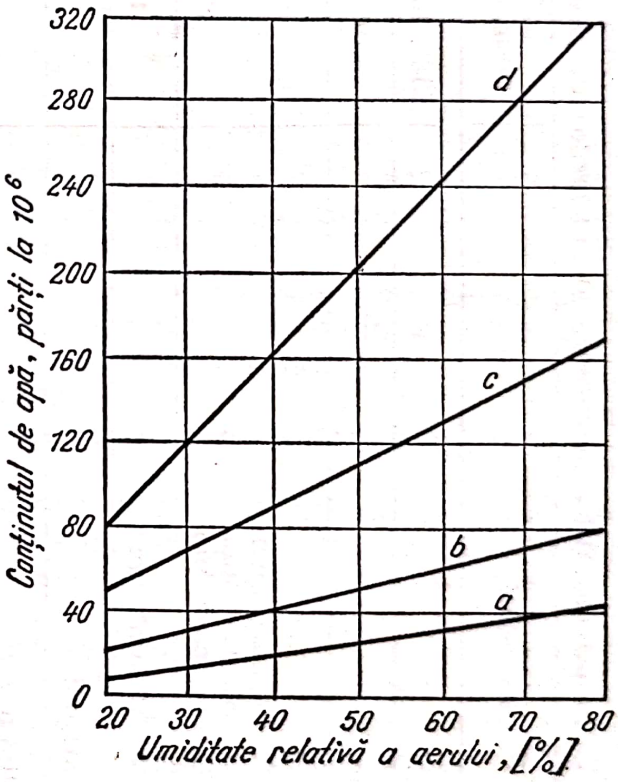


Fig. 2.27. Dependența conținutului de apă în ulei, de umiditatea relativă a aerului: a — la 25°C; b — la 40°C; c — la 60°C; d — la 80°C.

Uleiul și apa absorbită rămîn în stare de soluție. Nu se produce însă schimbarea aspectului uleiului și de asemenea apa nu se decantează chiar după o perioadă lungă de decantare. Dacă cantitatea de apă din ulei depășește limita de saturație la temperatura respectivă, excedentul de apă trece în formă de suspensie care provoacă o tulburare a uleiului.

Dacă uleiul este în contact cu aerul, atunci între cele două medii se stabilește un echilibru și anume gradul de umiditate relativă a aeru-

Scanned with OKEN Scanner

Proprietăți fizice și chimice ale uleiurilor de transformator *Tabelul 2.14*

Caracteristici	Condiții de admisibilitate	Metode de analiză
Aspect	Clar, limpede	Vizual
Densitate la 20°C, maximum	0,890	STAS 35-73
Viscozitate: — la +20°C, cSt maximum — la +50°C, cSt maximum — la —15°C, cSt maximum	 30 10 800	STAS 117-66
Punct de inflamabilitate MP, °C minimum	140	STAS 5488-56
Punct de congelare, °C maximum	40	STAS 39-56
Aciditate minerală și alcalinitate	lipsă	STAS 22-64
Aciditate organică, mg KOH/g maximum	0,03	STAS 23-68
Impurități mecanice	lipsă	STAS 33-71
Coroziune	negativ	STAS 40-61 metoda II
Furfurol	lipsă	STAS 3663-53
Rigiditate dielectrică, kV/cm minimum — la ulei netratat — la ulei tratat	 120 200	 pct. 4. STAS 286-63
Tangenta unghiului de pierderi dielectrice la 90°C maximum	$5 \cdot 10^{-3}$	STAS 6799-71
Stabilitatea la oxidare prin încălzire: — gudroane, % maximum — aciditate organică, mg KOH/g maximum	 0,10 0,35	STAS 6798-63

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 2.15

Solubilitatea maximă a apei în uleiul de transformator la presiunea atmosferică

Temperatura °C	Solubilitatea apei	
	p. p. m.	%
12	30	0,003 0
20	44	0,004 4
30	67	0,006 7
40	101	0,010 1
50	149	0,014 9
60	213	0,021 3
80	411	0,041 1

lui şi gradul de umiditate relativă a uleiului tind spre aceeaşi valoare. Astfel, dacă uleiul se află în contact cu aerul, umiditatea relativă a aerului fiind de 70% iar temperatura uleiului de 60°C, uleiul va absorbi din aer 70% din valoarea umidităţii de saturaţie, care conform tabelului 2.15 este de 213 p.p.m., adică 150 p.p.m. umiditate.

Dacă ulterior acest ulei este răcit la temperatura de 30°C pentru, care conform tabelului 2.15 corespunde umiditatea de saturaţie de 67 p.p.m. excesul de umiditate, adică aproximativ 83 p.p.m. trece în formă de apă, mai întîi sub forma de suspensie fină, care apoi se precipită la fundul cuvei.

Deci la transformatoarele la care se produc variaţii mari de temperatură au loc succesiv două fenomene: absorbţia de umiditate din atmosfera ambiantă şi echilibrul între umiditatea relativă a uleiului şi umiditatea relativă a aerului înconjurător.

Prin urmare, se poate spune că se produce o respiraţie a transformatorului.

Este util de adăugat că chiar uleiul obţinut direct de la rafinărie conţine o cantitate de umiditate. În adevăr, dacă nu se fac menţiuni speciale, rafinăria poate livra un ulei care poate îndeplini condiţiile prevăzute prin prescripţii chiar pentru un conţinut de umiditate, de exemplu 30 ... 40 p.p.m. şi de asemenea există posibilitatea ca în cursul transportului uleiul să absoarbă umiditate în plus, care să nu poată fi constatată prin încercările electrice. De aceea, înainte de utilizarea uleiului, adică înainte de introducerea uleiului în transformator, uleiul trebuie să fie tratat din nou pentru eliminarea umidităţii.

Absorbţia gazelor. Uleiul de transformator are tendinţa de a absorbi gaze. Volumul de aer dizolvat de ulei este influenţat mult de presiune şi mai puţin de temperatură.

La presiunea atmosferică normală, cantitatea de aer din ulei este de 10% din volum. Uleiul nu absoarbe în egală măsură constituenţii aerului. Astfel aerul atmosferic este format dintr-un amestec 78,09% azot şi 20,95% oxigen în volum, iar aerul din soluţia de ulei este format din 69,8% azot şi 30,2% oxigen.

Scanned with OKEN Scanner

Odată cu creşterea presiunii sau a temperaturii, creşte cantitatea de gaz care poate fi obţinută în soluţia de ulei. La numeroase lichide, solubilitatea gazului scade la creşterea temperaturii, dar la uleiul de transformator fenomenul este invers.

La transformatoarele la care suprafaţa uleiului se află în contact cu suprafaţa aerului, cum se întîmplă la transformatoarele cu conservator cu ulei, este necesar să se ia în considerare numai variaţiile de temperatură care au însă o influenţă mică. De exemplu, la o variaţie a temperaturii de 30°C, conţinutul de aer al uleiului variază numai cu 0,45%.

Dacă transformatorul este de tip etanş, atunci presiunea şi temperatura sînt legate între ele prin dilatarea termică. Astfel, dacă temperatura uleiului creşte, uleiul se dilată şi presiunea păturii de aer creşte. Dacă temperatura scade, volumul uleiului se micşorează, iar presiunea păturii de aer scade şi atunci uleiul conţine mai mult aer decît poate dizolva la acea presiune şi excesul de aer este eliberat de ulei. Acest fenomen se produce într-un timp de cîteva zile sau săptămîni, iar durata acestui fenomen depinde de raportul dintre suprafaţa de ulei în contact cu aerul şi volumul total de ulei.

Cînd uleiul devine suprasaturat cu aer, cum se întîmplă cînd presiunea scade brusc, atunci în ulei se formează bule de aer. Aceste bule de aer reduc mult rigiditatea dielectrică a uleiului.

Gazul cel mai nefavorabil pentru ulei este oxigenul, deoarece produce îmbătrînirea uleiului prin oxidare. De aceea, în uleiul de transformator se introduc substanţe chimice denumite inhibitori, al căror rol este protejarea uleiului contra oxidării.

Impurităţi. În ulei pot exista impurităţi solide şi nămoluri. Impurităţile apar accidental în cuve şi radiatoare şi sînt în special fibre de celuloză care micşorează rigiditatea dielectrică a uleiului.

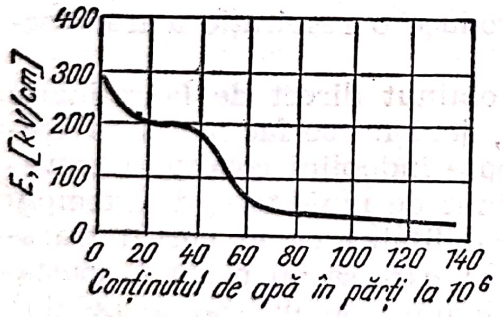


Fig. 2.28. Variaţia rigidităţii dielectrice a uleiului, în funcţie de conţinutul de apă.

Nămolurile sînt produse de transformări interne ale uleiului, şi anume oxidarea şi dizolvarea în ulei a diferitelor materiale care sînt cufundate în ulei.

Efectul impurităţilor asupra proprietăţilor uleiului constă în înrăutăţirea caracteristicilor electrice ale uleiurilor, şi anume a rigidităţii dielectrice, rezistivităţii, permitivităţii şi a unghiului de pierderi dielectrice.

În figura 2.28 este arătată variaţia rigidităţii dielectrice a uleiului în funcţie de conţinutul de apă. De pe această curbă se observă că, pentru anumite valori ale umidităţii, are loc o scădere bruscă a rigidităţii dielectrice a uleiului.

Unghiul de pierderi este de asemenea o caracteristică importantă a uleiului de transformator. Acest unghi este determinat de pierderile în dielectric.

Scanned with OKEN Scanner

Valoarea tangentei unghiului de pierderi, adică tg δ, este de dorit să fie cît mai mică. Dar valoarea lui tg δ crește din cauza prezenței impurităților în ulei, în special a acelora care au molecule polare.

Purificarea uleiurilor. Pentru a dispune de un ulei cu caracteristici corespunzătoare este necesar să se aplice metode de purificare a uleiului care să elimine impuritățile din ulei. Se vor expune succesiv metodele cunoscute.

Prin *filtrare* se realizează în mare măsură purificarea uleiului, și anume se separă materialele în suspensie.

Filtrele se realizează din materiale poroase și totdeauna, pentru a fi utilizate, este necesar să existe o cădere de presiune care să asigure trecerea uleiului. Setul filtrant se execută din foi de hîrtie, carton, textile, materiale ceramice sau materiale sinterizate.

Filtrele au o eficacitate mare față de apa în suspensie, deoarece hîrtia și cartonul sînt puternic higroscopice, dar au o mică eficacitate față de apa în soluție. De asemenea, este necesar ca filtrele să fie înlocuite imediat ce s-au saturat de apă, pentru a evita ca apa din filtru să nu fie iarăși cedată uleiului.

Decantarea permite purificarea uleiului într-o oarecare măsură. Dacă nu există nici o diferență de densitate între ulei și impuritățile în suspensie sau dacă diferența este mică, nu există nici o posibilitate de separare prin decantare.

De asemenea, dacă dimensiunile particulelor de impuritate sînt mici, decantarea nu permite separarea impurităților.

Centrifugarea reprezintă un mijloc de separare mult mai rapid și mai eficace decît decantarea. Totuși și aici există o limitare a eficacității metodei, dacă densitatea uleiului și densitatea impurităților sînt foarte apropiate.

Metoda nu are efect asupra conținutului de apă din ulei în cazul în care apa se află în stare de soluție. Un alt inconvenient constă în aceea că, dacă descărcarea uleiului din rotor se face în aer liber, atunci se produce o creștere a conținutului de aer a uleiului. Din aceste motive, centrifugele utilizate pentru purificarea uleiului de transformator, funcționează în general la presiune redusă. Uleiul curățat este trecut printr-o cuvă cu vid moderat și cu această ocazie se realizează o uscare a uleiului prin evaporarea apei, care trece din soluție în stare de suspensie, la micșorarea presiunii.

Încălzirea uleiului de transformator la temperatura de peste 100°C permite eliminarea sigură a umidității. Metoda prezintă însă inconvenientul că, în cazul în care fierberea se face în contact cu aerul la presiune normală, se produce o oxidare rapidă a uleiului de transformator.

Dacă uleiul umed este supus la presiuni reduse, atunci evaporarea apei se produce la temperaturi sub 100°C. Metoda de purificare prin uscare sub vid constă tocmai în realizarea încălzirii uleiului la o presiune joasă, ceea ce are ca efect evaporarea apei, la temperaturi sub 100°C.

Scanned with OKEN Scanner

În fig. 2.29 se dă curba valorilor minime ale temperaturii la care trebuie încălzit uleiul în funcție de presiune.

Este necesar să se încălzească uleiul la o temperatură ceva mai mare pentru a compensa efectul de răcire a uleiului, datorită faptului că apa care se evaporă absoarbe căldură și pentru a compensa efectul tensiunii superficiale a uleiului asupra presiunii. Pentru accelerarea fenomenului de uscare, este necesar ca în timpul uscării sub presiune, uleiul să prezinte o suprafață de contact cît mai mare cu mediul în care se produce evaporarea.

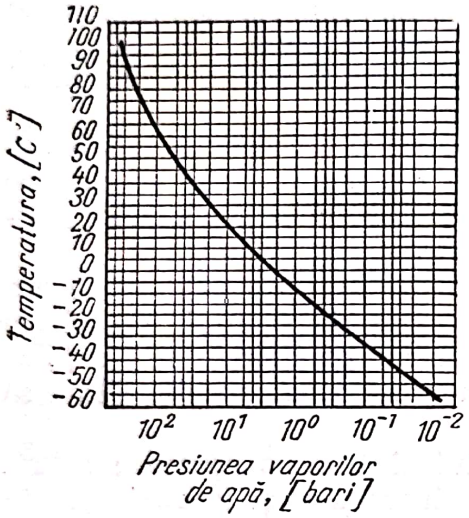


Fig. 2.29. Diagrama presiunii vaporilor de apă, în funcție de temperatură.

2.6.3. Transportul și păstrarea uleiului de transformator

În baza celor arătate, rezultă că în cursul transportului și păstrării uleiului de transformator este necesar să se ia măsuri cît mai sigure pentru a preveni pătrunderea impurităților.

Pentru transportul uleiului se utilizează butoaie și cisterne, avînd asigurată o bună etanșare, iar uneori se utilizează chiar introducerea unui gaz inert sub presiune, care să evite contactul uleiului cu aerul.

La descărcarea uleiului se neglijează însă de multe ori aplicarea unor măsuri de precauție, ceea ce permite pătrunderea umidității.

Astfel, trebuie să se aibă în vedere faptul că uleiul absoarbe mult mai ușor aerul și umiditatea din atmosferă cînd este cald. De aceea, cînd uleiul tratat și încălzit trebuie trecut în rezervoare, trecerea urmează să se facă după ce temperatura uleiului a ajuns la aceea a mediului ambiant.

Nu este de loc admisibil să se conserve uleiul în rezervoare încălzite în scopul de a-l deshidrata mai bine sau de a evita absorbția de apă, deoarece se obțin dimpotrivă rezultate negative.

Se recomandă ca rezervoarele de depozitare a uleiului de transformator, executate pentru presiunea atmosferică, să fie protejate cu filtre de aer cu silicagel sau chiar cu atmosferă de azot. De asemenea, este recomandabil să se utilizeze rezervoare de depozitare cu protejare prin vid.

Pompele de ulei trebuie să fie menținute în condițiile cele mai bune de funcționare, evitîndu-se posibilitatea pătrunderii aerului prin diferite îmbinări. Conductele de transport al uleiului de transformator este preferabil să fie executate din țeavă de oțel. Se recomandă evitarea conductoarelor flexibile.

Pentru conducte flexibile se recomandă utilizarea furtunului de cauciuc special, rezistent la ulei cald și întărit cu spirală metalică. Tuburile

Scanned with OKEN Scanner

flexibile metalice executate dintr-o spirală cu garnituri nu sînt recomandabile, deoarece după un anumit timp îşi pierd etanşeitatea.

Este necesar de adăugat că trebuie luate măsuri sigure pentru a utiliza tuburi etanşe, deoarece, deşi controlul funcţionării unui tub sub presiune este uşor de făcut, controlul funcţionării în aspiraţie este mult mai greu de realizat.

2.6.4. Protecţia izolaţiei transformatoarelor în exploatare

Proprietăţile materialelor izolante care intră în construcţia transformatoarelor scad în timpul funcţionării îndelungate. Astfel, caracteristicile izolante ale uleiului, se înrăutăţesc sub influenţa a doi factori: umiditatea şi oxigenul. Din acest motiv metoda cea mai simplă de protecţie a uleiului este izolarea lui de atmosferă. La majoritatea transformatoarelor de construcţie europeană, actuală, acest rol de protecţie este asigurat de conservator.

Funcţionarea conservatorului este caracterizată prin:

— suprafaţă de contact între ulei şi aer în conservator, mică;

— temperatura uleiului în conservator mai mare decît aceea a mediului ambiant cu aproximativ 15—20°C, ceea ce reduce absorbţia de aer şi umiditate în ulei;

— schimbul de ulei între conservator şi cuvă, redus.

Pentru a se reduce şi mai mult influenţa umidităţii atmosferice, se introduce pe ţeava de legătură dintre conservator şi mediul înconjurător un dispozitiv în care aerul trece printr-un strat care absoarbe umiditatea.

Ca material absorbant se foloseşte în prezent gel de siliciu, denumit silicagel, în care se introduce un mic adaos de clorură de calciu, care dă silicagelului uscat o culoare albastră.

După ce silicagelul absoarbe umiditatea culoarea sa se schimbă în roşu.

Caracteristicile higroscopice ale silicagelului pot fi refăcute, încălzindu-l la o temperatură de 400 . . . 500°C, pînă cînd capătă iarăşi culoarea albastră.

2.6.5. Izolaţia de hîrtie a înfăşurărilor

Apa din ulei poate fi absorbită de izolaţia de hîrtie a înfăşurărilor. În fig. 2.30 se dau curbele cantităţii de apă în ulei în condiţii de echilibru, după anotimpuri, pentru zona temperată.

În fig 2.31 se dau curbele cantităţii de apă din izolaţia de hîrtie, după anotimpuri, pentru zona temperată.

Aceste curbe, deşi au caracter de orientare, permit să se stabilească concluzii practice importante.

Scanned with OKEN Scanner

Din curbele prezentate în figurile 2.30 și 2.31 rezultă că, dacă un transformator este bine încărcat în exploatare, izolația se menține în bune condiții fără să fie necesare măsuri speciale.

Situația este însă cu totul alta dacă transformatorul se află depozitat sau se află în rezervă. În acest caz temperatura uleiului transformatorului se află la temperatura mediului ambiant și rezultă valori ridicate ale umidității atît pentru ulei cît și pentru hîrtie. De asemenea, se constată că la temperaturi scăzute, de exemplu la temperatura mediului ambiant de 10°C, conținutul de umiditate din izolația de hîrtie este foarte ridicat și periculos pentru calitățile izolante ale hîrtiei, în timp ce conținutul de umiditate din ulei este mic și aproape neobservabil. Prin urmare, deși rigiditatea dielectrică a uleiului este satisfăcătoare, rigiditatea dielectrică a izolației de hîrtie este complet nesatisfăcătoare.

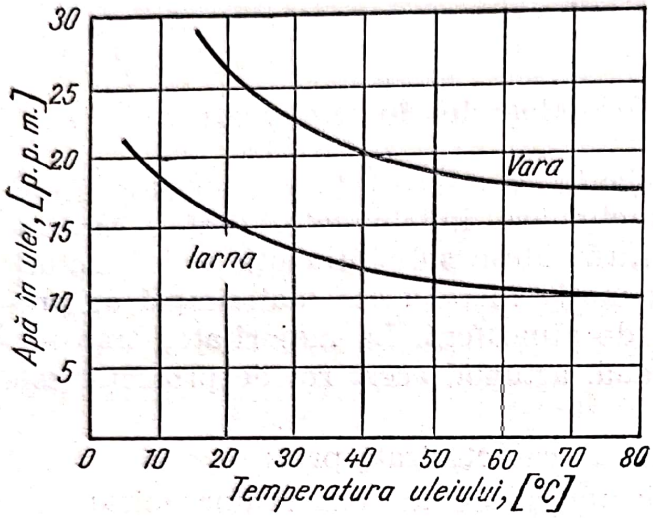


Fig. 2.30. Cantitatea de apă în ulei în condiții de echilibru, după anotimpuri.

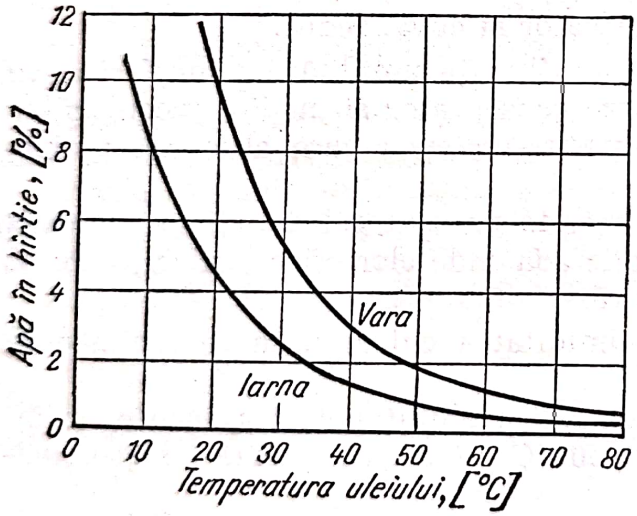


Fig. 2.31. Cantitatea de apă, în izolația de hîrtie, după anotimpuri, pentru zona temperată.

Controlul transformatoarelor care se află în depozit sau în rezervă este de aceea foarte important. Este necesar ca filtrul cu silicagel al conservatorului să fie bine întreținut. Este necesar de menționat, că filtrul cu silicagel asigură în acest caz protecția sigură a izolației transformatorului contra umidității.

Rezistența la oxidare a uleiurilor se poate îmbunătăți prin adăugarea în ulei a unor substanțe care împiedică oxidarea uleiului, denumiți inhibitori de oxidare, sau prin punerea transformatorului închis ermetic sub azot. Unul din inhibitorii utilizați este un antioxidant fenolic diterțiar-butil-para cresol notat d.tb.p.c.

Pentru uleiurile cu inhibitori, un proces de îmbătrînire a început să se manifeste după 15—20 de ani de serviciu.

Datele cunoscute pînă în prezent permit să se prevadă că utilizarea inhibitorilor, în condiții normale de exploatare, ar putea soluționa pro-

Scanned with OKEN Scanner

blema oxidării uleiului, cu condiția ca uleiul de transformator să fie inițial de bună calitate.

Mărimea tg δ nu depinde de măsurile de protecție contra oxidării.

După un timp îndelungat de funcționare, în uleiul de transformator apar depozite insolubile precipitate, care se depun pe fundul cuvei sub forma unor depozite de nămol.

Existența anormală a nămolului în cuvă, arată rezultatul unei oxidări importante a uleiului și a altor procese de transformare a uleiului. Astfel, depozitele de nămol care apar după 5 . . . 15 ani de funcționare nu sînt în general însoțite de produse de oxidare. Ele sînt produse de disoluția lentă în ulei a materialelor care fac parte din construcția transformatorului. Depozitele de nămol care apar după mai mult de 30 de ani de funcționare sînt datorite atît fenomenului de oxidare cît și fenomenului de disoluție lentă în ulei a materialelor care intră în construcția transformatorului.

Prezența nămolului are urmări defavorabile asupra calităților izolante ale transformatorului și încetinește schimbul de căldură. Deci efectul nămolului este reducerea duratei de funcționare a transformatorului. De aceea, în cazul cînd în ulei apare nămol, se impune tratarea uleiului cu pămînturi activate pentru îndepărtarea nămolului.

2.6.6. Comportarea în exploatare a transformatoarelor închise ermetic

În afara transformatoarelor cu conservator și filtru cu silicagel se construiesc și transformatoare închise ermetic. Acesta este tipul de transformator cel mai des construit în S.U.A. La aceste construcții pentru o protecție mai sigură, spațiul de dilatare care rămîne între suprafața uleiului și capacul cuvei se umple cu azot.

La creșterea încălzirii transformatorului ca urmare a măririi sarcinii, se produce o creștere a volumului uleiului, și o creștere a presiunii azotului, ceea ce produce mărirea cantității de gaz dizolvate în ulei.

Pentru menținerea constantă a presiunii azotului s-au propus dispozitive de reglare a presiunii.

Soluția constructivă cu uleiul închis ermetic a dat în exploatare rezultate bune pentru transformatoarele de măsură, unde variațiile de presiune și temperatură sînt mici. În schimb, la transformatoarele de putere, comportarea în exploatare a arătat deficiențe însemnate, și anume, cînd temperatura crește, se mărește și presiunea și crește cantitatea de gaz dizolvat în ulei, cînd temperatura scade, de exemplu la micșorarea sarcinii, scade și presiunea și se produce eliberarea gazului care se află în ulei în stare de soluție. Eliberarea gazului se poate produce sub formă de bule care pot apărea chiar în zonele critice ale izolației producînd străpungerea intervalului și deci a izolației, scoțînd transformatorul din funcțiune.

Unghiul de pierderi crește odată cu durata de utilizare a uleiului, independent de eficiența protecției împotriva oxidării.

Scanned with OKEN Scanner

2.6.7. Transformatoare cu conservator cu membrană elastică

O metodă de protecție eficientă contra acțiunii umidității și aerului, constă în izolarea uleiului față de influența atmosferei printr-o membrană elastică din material plastic după cum se vede în figura 2.32.

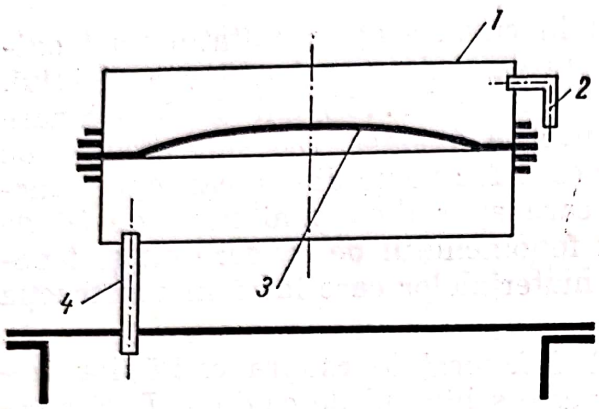


Fig. 2.32. Conservator cu membrană elastică:

1 — conservator, din două părți; *2* — intrarea aerului; *3* — membrană elastică din material plastic; *4* — țeavă de legătură între conservator și transformator.

Chiar la această construcție, unde uleiul este complet separat de aer, apare apă în ulei și în izolația de hîrtie prin descompunerea celulozei, dar cantitatea de apă care apare este foarte mică.

Acest mod de protecție reprezintă o soluție care este superioară în exploatare față de celelalte soluții cunoscute.

2.6.8. Comportarea uleiului în transformatoarele de distribuție care funcționează la temperaturi ridicate

Avînd în vedere importanța utilizării în transformatoarele de distribuție a unor uleiuri cu stabilitate mare, s-au efectuat cercetări referitoare la comportarea uleiului inhibat și a uleiului neinhibat la funcționarea transformatorului la o temperatură ridicată.

Pentru a aprecia stabilitatea relativă a celor două uleiuri s-a ales drept criteriu principal de comparare creșterea acidității, iar drept criteriu auxiliar absorbția de oxigen.

Trebuie menționat că în decursul funcționării inhibitorul se consumă.

S-au efectuat în acest scop încercări pe două transformatoare fiecare de 50 kVA, 11/0,4 kV unul cu ulei neinhibat, altul cu ulei inhibat; amîndouă au fost lăsate să funcționeze în condiții anormale și anume la temperaturi maxime ale uleiului de 100—105°C și la o temperatură medie a înfășurărilor de 115°C timp de 30 de luni.

La uleiul inhibat, după 20 de luni de funcționare, aciditatea a rămas redusă (aproximativ 0,1 mg KOH/g), uleiul a rămas limpede și nu s-a format nămol. Creșterea acidității a devenit importantă abia după aproximativ 24 de luni de funcționare, puțin înainte de epuizarea completă a conținutului de inhibitor.

La uleiul neinhibat, după 12 luni de funcționare, aciditatea uleiului a atins o valoare relativ mare (0,4 mg KOH/g). Uleiul s-a închis la culoare și a început să apară tendința formării de nămol. După 12 luni de funcționare uleiul neinhibat a fost înlocuit cu ulei nou. După alte 16 luni de funcționare aciditatea noului ulei era ridicată, și anume de 0,6 mg KOH/g.

Scanned with OKEN Scanner

Spre sfîrşitul perioadei de funcţionare de 30 de luni, a început să apară o creştere a temperaturii înfăşurărilor din trasformatorul cu ulei neinhibat din cauza depunerilor de nămol.

În general, bobinele s-au degradat termic, izolaţia de hîrtie devenind sfărîmăcioasă; totuşi, deşi proprietăţile mecanice ale hîrtiei scăzuseră simţitor, calităţile izolante rămîneau satisfăcătoare.

Rezultatele încercărilor au dovedit că utilizarea unui ulei cu inhibitor poate asigura o durată de funcţionare aproximativ dublă decît uleiul fără inhibitor.

2.7. USCAREA TRANSFORMATOARELOR

2.7.1. Generalităţi

Uscarea transformatoarelor în exploatare se face ori de cîte ori apare o umezire a izolaţiei înfăşurărilor şi după reparaţii în cadrul cărora s-au înlocuit total sau parţial înfăşurările sau izolaţia.

Uscarea transformatoarelor (a părţii decuvabile) în condiţiile din exploatare se poate face prin mai multe metode, şi anume:

în cuva proprie, prin folosirea vidului şi a încălzirii bazate pe metoda pierderilor în oţelul cuvei;

prin tratarea uleiului în circuit închis;

în cuva proprie, fără folosirea vidului, însă cu ventilarea părţii decuvabile cu aer cald pentru îndepărtarea umezelii;

uscarea părţii decuvabile prin închidere într-un dulap special, izolat termic şi introducerea de aer cald trimis de o suflantă;

cu raze infraroşii (cazul transformatoarelor mici), folosind lămpi speciale, plasate pe panouri de jur împrejurul înfăşurărilor transformatorului.

Se vor descrie în continuare două dintre metodele de uscare a transformatoarelor, mai des folosite.

2.7.2. Uscarea transformatoarelor în cuvă proprie, fără vid

Înainte de uscare se scoate uleiul din cuvă, iar cuva se şterge pînă cînd se usucă. Pe partea decuvabilă a transformatorului se aşază termometre cu rezistenţă sau termocupluri pentru controlul temperaturii. Partea decuvabilă este introdusă în cuvă şi se acoperă cu capacul. Cuva transformatorului este izolată prin două straturi de foi de azbest cu grosimea de 4—5 mm, legate cu sfoară sau benzi textile (folosirea sîrmei nu este recomandabilă). În afară de aceasta, pentru micşorarea pierderilor de căldură, se recomandă ca transformatorul să fie introdus într-o cameră izolată termic (figura 2.33).

Scanned with OKEN Scanner

Deasupra izolației cuvei se înfășoară un bobinaj pentru magnetizare. Dacă izolația termică lipsește, bobinajul de magnetizare se înfășoară pe șipci de lemn distanțate la 1—2 cm față de cuvă.

Dacă transformatorul este prevăzut cu radiatoare demontabile, ele se scot. La transformatoarele cu cuvă prevăzută cu țevi sau cu nervuri, bobinajul de magnetizare se pune lateral peste țevi sau nervuri.

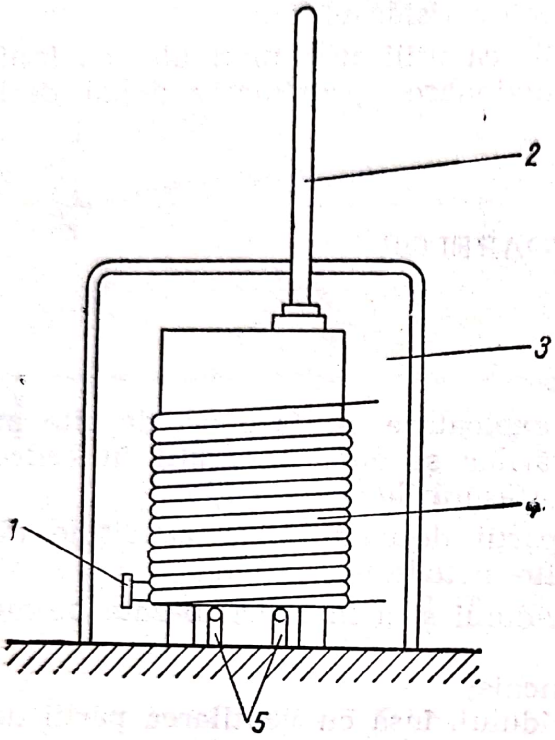


Fig. 2.33. Schema de uscare a transformatoarelor în cuvă proprie:
1 — flanșa robinetului de scurgere a uleiului; *2* — țeava de aerisire; *3* — cameră izolată termic; *4* — bobinaj de magnetizare; *5* — încălzitor. electric.

Pentru a obține o repartizare mai uniformă a temperaturii, bobinajul de magnetizare se înfășoară pe partea de jos a cuvei, pe o distanță de 40 . . . 60% din înălțimea cuvei; la partea inferioară a cuvei spirele sînt amplasate aproape una lîngă alta. Bobinajul de magnetizare se execută din conductoare izolate cu azbest. Se pot utiliza și conductoare de altă clasă de izolație, însă în acest caz curentul se micșorează pînă la 60—70% din cel admisibil la izolarea normală. În tabelul 2.16 sînt prezentate date orientative privind alegerea înfășurării de magnetizare, pentru transformatoarele pînă la 1 000 kVA, în cuve prevăzute cu țevi.

În cele ce urmează se dă un exemplu de calcul al bobinajului de magnetizare pentru uscarea transformatoarelor cu puteri de peste 1 000 kVA.

Puterea necesară pentru uscare este

$$P = kF\,(100 - t_0)\,10^{-3}\ [\text{kW}], \qquad (2.1)$$

unde: F este aria suprafeței cuvei transformatorului, în m²;
t_0 — temperatura mediului ambiant, în °C;
k — coeficient, egal cu 5 în cazul în care cuva este izolată termic și egal cu 12 în caz contrar.

Pierderile specifice sînt:

$$\Delta P = \frac{P}{F_0}\ [\text{kW/m}^2], \qquad (2.2)$$

unde: F_0 este aria suprafeței cuvei cuprinsă de bobinajul de magnetizare, în m².

Această suprafață este:

$$F_0 = lh,$$

unde: l este perimetrul cuvei, în m;
h — înălțimea suprafeței laterale ocupată de bobinajul de magnetizare, în m.

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 2.16

Date pentru orientare la alegerea bobinajelor de magnetizare

Puterea transformatorului, kVA	Perimetrul, m	Temperatura mediului ambiant, °C.	Tensiunea bobinajului de magnetizare					
			65 V		120 V		220V	
			Numărul de spire	Curentul, A	Numărul de spire	Curentul, A	Numărul de spire	Curentul, A
100	2,4	0	47/30*)	37/91	—	—	—	—
		15	52/36	31/74	—	—	—	—
		30	53/39	26/64	—	—	—	—
180	2,54	0	45/33	42/103	—	—	—	—
		15	49/34	35/88	—	—	—	—
		30	50/37	29/72	—	—	—	—
320	2,75	0	42/30	60/124	—	—	—	—
		15	44/32	42/106	—	—	—	—
		30	47/34	35/87	—	—	—	—
560	3,52	0	34/24	80/198	63/45	43/107	—	—
		15	35/26	68/168	67/47	37/91	—	—
		30	38/28	56/138	7I/51	30/75	—	—
750	3,94	0	29/21	105/264	54/39	57/143	100/71	32/66
		15	31/22	89/224	57/42	48/121	105/76	28/56
		30	33/24	74/184	61/45	40/100	112/82	23/46
1000	4,04	0	29/21	124/315	53/38	67/170	98/70	37/79
		15	30/22	107/265	56/41	58/144	103/75	31/66
		30	32/24	88/219	60/44	48/119	110/81	29/55

*) În cazul în care cuva este izolată termic, se ia valoarea de la numărător, în caz contrar, cea de la numitor.

Numărul de spire al bobinajului de magnetizare va fi:

$$w = \frac{U A}{L}$$

unde: U este tensiunea aplicată bobinajului, în V;

L — lungimea unei spire, în m;

A — lungimea bobinajului de magnetizare care revine la 1 V de tensiune aplicată bobinajului.

Valorile mărimii A se găsesc în tabelul 2.17., în funcție de pierderile specifice ΔP.

Curentul în bobinajul de magnetizare se calculează cu formula

$$I = \frac{P}{U \cos \varphi} \qquad (2.3)$$

în care $\cos \varphi = 0{,}5 \ldots 0{,}7$.

Exemplu. Să se determine caracteristicile bobinajului de magnetizare a unui transformator (în ulei) cu următoarele date: perimetrul cuvei $l = 4{,}66$ m; aria supra-

Tabelul 2.17

Lungimea bobinajului de magnetizare (A) în funcție de pierderile specifice (ΔP)

ΔP	A	ΔP	A	ΔP	A	ΔP	A
0,1	4,21	1,0	1,85	1,9	1,47	2,8	1,27
0,2	3,20	1,1	1,78	2,0	1,44	2,9	1,26
0,3	2,76	1,2	1,72	2,1	1,42	3,0	1,24
0,4	2,48	1,3	1,68	2,2	1,39	3,25	1,20
0,5	2,30	1,4	1,63	2,3	1,37	3,50	1,18
0,6	2,17	1,5	1,60	2,4	1,35	3,75	1,15
0,7	2,06	1,6	1,55	2,5	1,32	4,0	1,12
0,8	1,97	1,7	1,53	2,6	1,31	—	—
0,9	1,90	1,8	1,49	2,7	1,29	—	—

feței laterale a acesteia $F=14,6$ m²; cuva transformatorului este izolată termic; temperatura aerului înconjurător este $t_0=20°C$.

Puterea necesară pentru uscare va fi:

$$P=kF\ (100-t_0)\cdot 10^{-3}=5\cdot 14,6\ (100-20)\cdot 10^{-3}=5,84\ \text{kW}.$$

Înălțimea h se ia egală cu 1,4 m.

Aria suprafeței cuvei ocupată de bobinaj este:

$$F_0=lh=4,66\cdot 1,4=6,5\ \text{m}^2.$$

Pierderile specifice:

$$\Delta P=\frac{P}{F_0}=\frac{5,84}{6,5}=0,9\ \text{kW/m}^2.$$

Conform tabelului 2.17, pentru $\Delta P=0,9$; $A=1,9$.

Numărul de spire al bobinajului de magnetizare pentru tensiunea de 220 V rezultă:

$$w=\frac{UA}{L}=\frac{127\cdot 1,9}{4,66}=52\ \text{spire}.$$

Curentul în bobinajul de magnetizare

$$I=\frac{P}{U\cos\varphi}=\frac{5\,840}{220\cdot 0,6}=43\ \text{A}.$$

Pentru bobinajul de magnetizare se ia un conductor cu secțiunea de 25 mm² (rezultă ≈ 3 A/mm²).

Drept surse pentru alimentarea bobinajului de magnetizare pot servi transformatoare de sudură, transformatoare pentru încălzirea betonului sau rețelele cu tensiunea de 220/127 și 380/220 V.

În procesul de uscare, pentru evacuarea umezelii, partea decuvabilă a transformatorului se ventilează cu ajutorul ventilatorului prin unul din orificiile din capacul transformatorului sau prin orificiile de trecere a izolatoarelor. Aerul intră în cuvă prin flanșa robinetului de scurgere a uleiului și este încălzit în prealabil în încălzitoare electrice aflate sub cuva transformatorului (v. figura 2.33). Se poate amenaja și o ventilație

Scanned with OKEN Scanner

naturală prin instalarea pe capacul cuvei a unei țevi verticale cu înălțimea de 2—2,5 m. Aerul intră în camera izolată prin orificiile din partea ei inferioară. Temperatura cuvei trebuie ridicată treptat, în așa fel încît viteza de creștere a temperaturii să nu depășească 30—40°C/oră. Temperatura aerului cald în interiorul cuvei trebuie să fie menținută la 100—105°C. Reglarea temperaturii se face fie prin modificarea numărului de spire al bobinajului de magnetizare, fie prin deconectarea periodică a bobinajului. În acest scop se recomandă amenajarea a 1...2 derivații (prize) de la bobinajul de magnetizare.

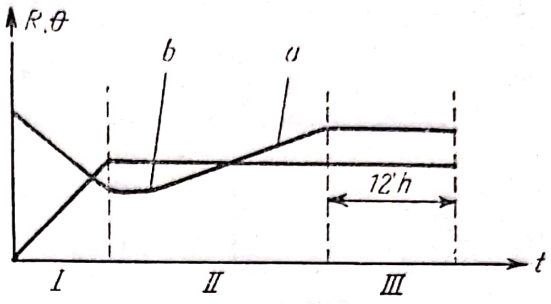


Fig. 2.34. Variația rezistenței izolației, în timp, la uscarea transformatoarelor:
a — $R_{izol}=f(t)$; b — θ (°C)$=f(t)$.

Pentru o uscare mai intensă se recomandă să se reducă periodic temperatura pînă la 50...60°C și din nou să fie mărită pînă la 100...105°C.

În timpul uscării se completează un caiet în care din oră în oră se înscriu indicațiile tuturor termometrelor, valoarea curentului, tensiunea și numărul de spire ale bobinajului de magnetizare, iar din două în două ore, rezistența de izolație dintre bobinaje și în raport cu corpul.

Sfîrșitul uscării se apreciază după forma curbei rezistenței de izolație (ea este analogă cu forma curbei rezistenței de izolație în cazul uscării mașinilor rotative (figura 2.34).

Uscarea se consideră terminată dacă valoarea rezistenței de izolație a înfășurărilor, la temperatura stabilizată de 100...105°C, se menține constantă în decurs de 6...8 ore.

După uscare, se procedează la revizia părții decuvabile, se înlătură termometrele, se verifică și se strîng îmbinările, după aceasta partea decuvabilă este coborîtă în cuvă, care se umple apoi cu ulei curat.

2.7.3. Uscarea prin tratarea uleiului în circuit închis

Echipamentul minim necesar pentru efectuarea uscării se compune din:

o instalație de tratare a uleiului cu o capacitate de minimum 1 600 l/oră, prevăzută cu un sistem de încălzire a uleiului pînă la 95°C și cu posibilitatea de a crea în rezervor un vid de cel puțin 0,04 bar (aproximativ 30 torr);

două conducte cu diametre corespunzătoare (de obicei cu racord cu filet de $3^1/_2''$) pentru legătura la robinetele transformatorului;

un megohmmetru de 10 000 MΩ, la 2 500 V;

o instalație de măsurat rigiditatea dielectrică a uleiului.

Uleiul se tratează în felul următor:

se închide robinetul dintre releul Buchholz și conservator;

se racordează transformatorul la instalația de tratare a uleiului ca în figura 2.35;

după racordare se deschid robinetele *1* și în același moment se pornește instalația;

se începe încălzirea uleiului, evaporarea sub vid și procesul de filtrare. Umezeala pătrunsă eventual în transformator este antrenată de ulei și este eliminată atît timp cît continuă procesul de uscare;

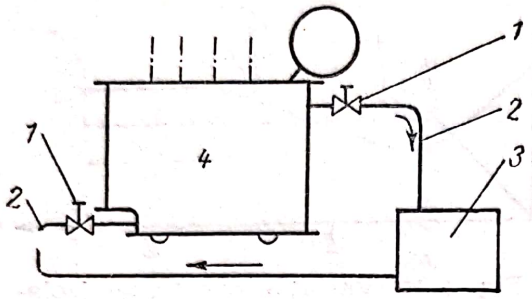


Fig. 2.35. Racordarea instalației de tratare a uleiului la transformator:
1 — robinete; *2* — conducte de legătură; *3* — instalația de tratare a uleiului; *4* — transformator; săgeata indică sensul de circulație a uleiului.

se încălzește uleiul în continuare pînă cînd temperatura în transformator se stabilizează, avînd grijă ca temperatura uleiului, măsurată în rezervorul instalației, să nu treacă de 90°C;

procesul de uscare se controlează măsurînd rezistența izolației înfășurărilor și ridicînd curba variației acesteia în timp. Alura curbei trebuie să fie ca în figura 2.34.

În prima perioadă în care temperatura crește, rezistența izolației scade (domeniul *I*). Apoi, în timp ce temperatura rămîne constantă, rezistența izolației rămîne și ea constantă un timp, apoi crește pînă cînd atinge valoarea maximă (domeniul *II*). După un interval de aproximativ 12 ore de la punctul de stabilizare a rezistenței de izolație la valoarea maximă (domeniul *III*), uscarea se consideră terminată. În acest moment rigiditatea dielectrică a uleiului în transformator trebuie să aibă valoarea prescrisă (în jur de 200 kV/cm);

după efectuarea uscării se închide robinetul din partea de jos a transformatorului și se continuă pomparea uleiului din rezervor în transformator;

după golirea rezervorului se închide robinetul din partea de sus a transformatorului, se oprește și se deconectează instalația;

se pregătește transformatorul pentru încercări sau pentru punerea în funcțiune, deschizînd robinetul dintre releul Buchholz și conservator, făcînd aerisirile necesare la izolatoare, radiatoare, comutatorul de reglaj etc.

În cazul transformatoarelor pînă la 35 kV care au fost reparate capital, se poate face conectarea la rețea fără uscare, dacă partea decuvabilă nu s-a aflat mai mult de 24 ore în contact cu aer cu o umiditate mai mare de 75%.

Dacă în timpul reparării, temperatura părții decuvabile este mai mare decît temperatura aerului înconjurător cu 3 . . . 5°C, atunci durata admisibilă de rămînere în aer a părții decuvabile este de trei ori mai mare.

Decuvarea transformatorului se face numai în condițiile cînd temperatura straturilor superioare de ulei este egală sau mai mare decît

Scanned with OKEN Scanner

temperatura atelierului în care se va face reparația. În cazul cînd umiditatea aerului din atelier este mai mare de 75%, decuvarea se va face numai dacă temperatura straturilor superioare de ulei din cuvă este mai mare cu cel puțin 10°C față de temperatura mediului înconjurător.

Necesitatea uscării transformatoarelor după o stocare îndelungată sau după reparațiile capitale, în cazul cînd părțile lor decuvabile s-au găsit în aer mai mult decît termenele indicate sau în cazul unei umidități mărite, se stabilește pe baza unor verificări și măsurători corespunzătoare a rezistenței de izolație, a capacității și a tangentei unghiului de pierderi.

Conectarea la rețea a transformatoarelor în ulei după montaj (transformatoare noi sau reparate capital) fără uscare prealabilă este posibilă cu respectarea unor anumite condiții care diferă în raport cu puterea, construcția și tensiunea transformatorului.

2.8. CONECTAREA LA REȚEA A TRANSFORMATOARELOR FĂRĂ USCARE

2.8.1. Generalități

Din cele descrise anterior rezultă că uscarea transformatoarelor în condițiile exploatării, este destul de dificilă. Unele unități economice mai mici nu dispun nici de mijloacele minime necesare pentru realizarea uscării transformatoarelor, din care cauză trebuie să comande repararea transformatoarelor la unități specializate, lungind astfel timpul de staționare al transformatorului și în același timp mărind costul reparației.

Luînd în considerare dificultățile tehnice și cheltuielile cauzate de uscarea transformatoarelor, s-au studiat condițiile în care transformatoarele pot fi conectate la rețea fără uscarea prealabilă.

Pentru a evita necesitatea uscării părții decuvabile, se va limita timpul de aflare în contact cu aerul și în același timp decuvarea se va face în încăperi cu umiditate sub 75%.

2.8.2. Condițiile de conectare fără uscare a transformatoarelor

Aceste condiții s-au stabilit pentru cinci grupe de transformatoare. Pentru fiecare grupă se arată în cele ce urmează în ce constă verificarea transformatorului la montaj și care sînt condițiile de conectare fără uscare.

Grupa I. *Transformatoarele de putere, cu conservator, pînă la 2 . . . 500 kVA inclusiv, tensiune pînă la 35 kV inclusiv și transformatoare fără conservator, de putere pînă la 100 kVA inclusiv, transportate cu ulei.*

Scanned with OKEN Scanner

Verificarea transformatorului la montaj constă în probele efectuate în următoarea ordine:

examinarea exterioară, verificarea nivelului de ulei, verificarea existenței plombelor de ventile și la bușonul pentru luarea probelor;

luarea probelor de ulei și încercarea la analiză redusă cu determinarea tensiunii de străpungere, a indicelui de aciditate, a lipsei de apă și impurității mecanice;

măsurarea rezistenței de izolație a înfășurărilor cu megohmmetrul, cu determinarea raportului R_{60}/R_{15} la temperatura mediului ambiant de minimum +10°C.

Condițiile de conectare fără uscare a transformatoarelor din grupa I sînt:

a — nivelul uleiului trebuie să fie între limitele marcate pe indicatoarele de ulei;

b — în ulei nu trebuie să existe urme de apă; tensiunea de străungere a uleiului trebuie să corespundă normelor;

c — raportul R_{60}/R_{15} trebuie să corespundă normelor;

d — dacă primele condiții nu sînt respectate, dar înfășurările transformatorului și comutatorului sînt acoperite cu ulei, sau dacă sînt respectate condițiile dar în ulei lipsesc urme de apă și tensiunea lui de străpungere este mai coborîtă în comparație cu cea cerută cu maximum 5 kV, se măsoară suplimentar mărimile C_2/C_{50} sau tg δ a înfășurărilor în ulei; dacă se efectuează o revizie cu scurgerea uleiului, se măsoară raportul $\Delta C/C$ a părții active fără ulei.

Rapoartele C_2/C_{50}, tg δ sau $\Delta C/C$* trebuie să corespundă normelor indicate în tabelele 2.18 și 2.19.

În cazul în care C_2/C_{50} nu corespunde normelor, se efectuează măsurarea tg δ a înfășurărilor. Dacă ultima mărime nu corespunde normelor, se face măsurarea tg δ a uleiului care este turnat în transformator.

Dacă în acest caz tg δ a uleiului depășește 0,6% la 20°C, atunci urmează a se lua măsuri care să elimine influența asupra valorii tg δ a înfășurărilor transformatorului (să se micșoreze tg δ a uleiului).

Dacă micșorarea tg δ a uleiului sau schimbarea sa nu sînt posibile, atunci se va măsura $\Delta C/C$ a părții active a transformatorului (fără ulei) sau se va măsura C_{cald}/C_{rece} cu controlul încălzirii uleiului, care trebuie să corespundă normelor indicate în tabelul 2.17.

Pentru conectarea fără uscare a transformatoarelor din grupa I este suficientă respectarea uneia din următoarele combinații ale condițiilor indicate mai sus:

pentru transformatoare de putere pînă la 100 kVA inclusiv (fără conservator), transportate cu ulei

a, b; b, d; a, d;

---

* $\frac{\Delta C}{C} = \frac{C_{rece} - C_{cald}}{C_{rece}}$ unde C_{rece} este capacitatea dintre înfășurările primare și secundare la temperatura ambiantă, măsurată la frecvența de 50 Hz iar C_{cald}, capacitatea măsurată în stare caldă. Ambele capacități se măsoară la transformatorul fără ulei în cuvă.

Tabelul 2.18

Valorile maxime ΔC/C ale înfăşurărilor transformatoarelor fără ulei

Clasa de tensiune a înfăşurărilor de înaltă tensiune		Temperatura, °C				
		10	20	30	40	50
1 Pînă la 35 kV inclusiv, puterea sub 10 000 kVA	Mărimea % $\Delta C/C$ la sfîrşitul reviziei	13	20	30	75	75
2 Idem	Diferenţa % între valorile $\Delta C/C$ la sfîrşitul şi începutul reviziei, raportate la aceeaşi temperatură.	4	6	9	13,5	22
3 Pînă la 35 kV inclusiv, putere 10 000 kVA şi mai mare; 110 kV şi mai mult, indiferent de putere	Mărimea % $\Delta C/C$ la sfîrşitul reviziei.	8	12	18	29	44
5 Idem	Diferenţa % între valorile $\Delta C/C$ la sfîrşitul şi începutul reviziei raportate la aceeaşi temperatură.	3	4	5	8,5	13

Tabelul 2.19

Coeficient de calcul pentru raportarea valorilor ΔC/C, măsurate la sfîrşitul reviziei, la temperatura înfăşurărilor de la începutul reviziei

t °C	5	10	15	20	25	30	35	35	40	45	50
K	1,25	1,55	1,95	2,4	3	3,7	4,6	5,7	5,7	7	8,8

pentru transformatoare de putere între 100 kVA şi 250 kVA şi tensiune pînă la 35 kV inclusiv, transportate cu ulei

a, b, c; b, c; a, b, d.

Grupa a II-a. *Transformatoare de putere sub 10 000 kVA şi tensiune pînă la 35 kV inclusiv, fără conservator, care se transportă cu ulei.*

Verificarea transformatorului la montaj constă în:

examinarea exterioară şi verificarea existenţei plombelor pe ventile şi la buşonul pentru luarea probelor, încercarea ermeticităţii etanşeităţii:

luarea probei de ulei și încercarea la analiză redusă, cu determinarea tensiunii de străpungere, a indicelui de aciditate, a lipsei de apă și impurităților mecanice;

măsurarea caracteristicilor de izolație cu determinarea R_{60}/R_{15} și C_2/C_{50} (la temperatura minim +10°C).

La admiterea conectării unui transformator fără uscare, este absolut necesară măsurarea caracteristicilor izolației după montarea transformatorului cu completarea cu ulei.

Pentru aprecierea inițială a stării izolației și rezolvarea problemei dacă să se înceapă uscarea, se pot efectua măsurările caracteristicilor de izolație pînă la începutul reviziei (dacă aceasta este prevăzută) sau pînă la începutul montării transformatorului. În acest caz, durata examinării părții active determinate de efectuarea măsurărilor, dacă acestea sînt însoțite de deschiderea capacului sau a altor locuri de vizitare, nu trebuie să depășească cele indicate în tabelul 2.20.

Tabelul 2.20

Durata maximă admisibilă de examinare a părții active a transformatoarelor în aer

Caracteristicile transformatoarelor	Durata maximă de menținere a părții active în mediul înconjurător (ore)			
	La umiditate relativă			La temperatura aerului înconjurător mai mică de (ore)
	pînă la	pînă la	pînă la	
Transformatoare de putere sub 10 000 kVA și tensiune pînă la 35 kV inclusiv	24	16	12	12
Transformatoare de putere 10 000 kVA și mai mare și tensiune la 35 kV precum și transformatoare la tensiuni de 110 kV și mai mari	16	12	8	8

Se admite ca măsurătorile finale ale caracteristicilor izolației să se facă pînă la montarea radiatoarelor.

Condițiile de conectare fără uscare a transformatoarelor din grupa a II-a sînt:

a — transformatorul trebuie să fie ermetic închis;

b — în ulei nu trebuie să existe urme de apă; tensiunea de străpungere a uleiului trebuie să corespundă normelor;

c — rapoartele R_{60}/R_{15} și C_2/C_{50} măsurate după terminarea montajului și completarea cu ulei, trebuie să corespundă normelor;

d — dacă valorile indicate la c (separat sau împreună) nu corespund normelor, se măsoară suplimentar fie tg δ a înfășurărilor în ulei, care trebuie să corespundă normelor, fie valoarea tg δ a uleiului care nu trebuie să difere față de cea dată în protocolul fabricii, raportată la temperatura măsurării în timpul montajului, cu mai mult de 30% în sensul înrăutățirii ei.

Scanned with OKEN Scanner

În cazul în care tg δ nu corespunde normelor şi datele măsurărilor din fabrică lipsesc, se efectuează măsurarea tg δ la uleiul cu care este umplut transformatorul.

Prin aceasta, dacă tg δ a uleiului creşte cu mai mult de 0,6%, trebuie luate măsuri care să elimine influenţa ei asupra valorii tg δ a înfăşurărilor transformatorului (să se schimbe uleiul, să se micşoreze tg δ a uleiului);

e — dacă micşorarea tg δ a uleiului (sau schimbarea uleiului) nu este posibilă, urmează să se măsoare valoarea $\Delta C/C$ a părţii active a transformatorului (fără ulei) sau să se măsoare valoarea C_{cald}/C_{rece} cu controlul încălzirii uleiului care trebuie să corespundă normelor indicate în tabelul 2.18.

Pentru conectarea fără uscare prealabilă a transformatoarelor din grupa a II-a, este suficientă respectarea uneia din următoarele combinaţii ale condiţiilor:

a, b, c; a, b, d; a, b, e

(dacă condiţiile d nu sînt îndeplinite din cauza valorii scăzute a tag δ a uleiului).

Grupa a III-a. *Transformatoare cu puteri de 10 000 kVA şi mai mari, cu tensiune pînă la 35 kV inclusiv, fără conservator, care se transportă cu ulei.*

Verificarea transformatorului la montaj constă în:

examinarea exterioară şi verificarea existenţei plombelor pe ventile şi la buşonul pentru luarea probelor; încercarea etanşărilor;

luarea probei de ulei şi încercarea la analiză redusă, cu determinarea tensiunii de străpungere, a indicelui de aciditate, a lipsei de apă şi impurităţilor mecanice;

dacă este prevăzută examinarea părţii active a transformatorului fără ulei, se face măsurarea raportului $\Delta C/C$ la începutul şi la sfîrşitul reviziei (înaintea umplerii cu ulei);

măsurarea caracteristicilor de izolaţie cu determinarea R_{60}/R_{15} şi C_2/C_{50} sau tg δ a înfăşurărilor.

Dacă nu este prevăzută verificarea părţii active a transformatorului, cu măsurarea raportului $\Delta C/C$, atunci se efectuează măsurarea tg δ a înfăşurărilor (după terminarea montajului şi umplerea cu ulei).

Condiţiile de conectare fără uscare a transformatoarelor din grupa a III-a sînt următoarele:

a — transformatorul trebuie să fie ermetic închis;

b — în ulei nu trebuie să fie urme de apă; tensiunea de străpungere a uleiului trebuie să corespundă normelor indicate în tabelul 2.12;

c — valorile $\Delta C/C$, măsurate la sfîrşitul reviziei (dacă se efectuează) nu trebuie să depăşească valorile indicate în tabelul 2.18, iar în afară de aceasta creşterea valorilor $\Delta C/C$ măsurate la sfîrşitul şi începutul reviziei, raportate la aceeaşi temperatură, nu trebuie să depăşească pe cele indicate în tabelul 2.19;

d — valorile R_{60}/R_{15}, C_2/C_{50} sau tg δ măsurate după terminarea montajului şi umplerea cu ulei trebuie să corespundă normelor, sau R_{60} şi tg δ măsurate în timpul montajului şi raportate la temperatura izola-

ției, nu trebuie să difere față de cele date în protocolul de fabrică cu mai mult de 30% în sensul înrăutățirii lor;

e — valoarea tg δ a înfășurărilor măsurate după terminarea montajului și umplerea cu ulei, trebuie să corespundă cerințelor d;

f — dacă una din valorile indicate la d și e nu corespunde normelor, suplimentar se măsoară valorile R_{60} și tg δ a înfășurărilor în ulei la temperatura izolației măsurate în fabrică; ele nu trebuie să difere față de datele din protocolul de fabrică cu mai mult de 30% în sensul înrăutățirii lor.

Pentru conectarea prealabilă fără uscare a transformatoarelor din grupa a III-a este suficientă respectarea uneia din următoarele combinații ale condițiilor:

a, b, c, d; a, c, d, e; a, b, c, e.

Grupa a IV-a *Transformatoare cu tensiuni de 110 kV și mai mari fără conservator, transportate cu ulei.*

Verificarea transformatorului la montaj constă în:

examinarea exterioară și verificarea existenței plombelor de ventile și la bușonul pentru luarea probelor, încercarea ermeticității etanșărilor;

luarea probei de ulei și încercarea la analiză redusă cu determinarea tensiunii de străpungere, a indicelui de aciditate, a lipsei de apă și impurităților mecanice;

dacă este prevăzută examinarea părții active a transformatorului cu uleiul scos, se face măsurarea $\Delta C/C$ la începutul și sfîrșitul reviziei (înaintea umplerii cu ulei);

măsurarea caracteristicilor de izolație R_{60} cu determinarea valorii R_{60}/R_{15} și tg δ a înfășurărilor la temperaturi de minim +10°C.

Condițiile de conectare fără uscare a transformatoarelor din grupa a IV-a sînt:

a — transformatorul trebuie să fie ermetic închis;

b — în ulei nu trebuie să fie urme de apă; tensiunea de străpungere a uleiului trebuie să corespundă normelor indicate în paragraful 2.5.1.;

c — valorile $\Delta C/C$ măsurate la sfîrșitul reviziei (dacă se face) nu trebuie să depășească valorile trecute în tabelul 2.18.; în afară de acestea, la creșterea valorii $\Delta C/C$, măsurările făcute la sfîrșitul și începutul reviziei la aceeași temperatură nu trebuie să depășească valorile indicate în tabelul 2.18.;

d — valorile R_{60} și tg δ a înfășurărilor, măsurate după terminarea montajului și umplerea cu ulei, trebuie să corespundă normelor sau R_{60} și tg δ a înfășurărilor, măsurate în timpul montajului și raportate la temperatura izolației, nu trebuie să difere față de cele date în protocolul de fabrică cu mai mult de 30% în sensul înrăutățirii lor.

Pentru conectarea fără uscare prealabilă a transformatorului din grupa a IV-a este suficientă respectarea uneia din următoarele combinații:

— a, b, d (dacă revizia părții active nu este prevăzută și nu se face);

— a, b, c, e (dacă este prevăzută examinarea părții active, cu scoaterea uleiului).

Scanned with OKEN Scanner

Grupa a V-a. *Transformatoare cu tensiune de 110 kV și mai mare, fără ulei.*

Verificarea constă în:

— examinarea exterioară și verificarea existenței plombelor pe ventile și la bușonul pentru luarea probelor, încercarea ermeticității etanșărilor;

— luarea probelor resturilor de ulei de pe fundul cuvei și încercarea la analiză redusă, cu determinarea tensiunii de străpungere, tg δ, lipsei de apă și impurităților mecanice;

— verificarea stării indicatorului cu silicagel sau alt indicator de umezeală (dacă este prevăzut); (dacă silicagelul are culoare albastru deschis sau indicatorul de umezeală — conform instrucțiunilor de fabrică — nu indică umezeală, atunci verificările continuă după indicațiile date, în ordinea de mai departe; dacă silicagelul și-a pierdut culoarea albastru deschis, sau alt indicator arată umezeală, atunci verificarea nu se mai continuă și transformatorul se pregătește de uscare);

— măsurarea $\Delta C/C$ la începutul și sfîrșitul reviziei părții active, dacă aceasta este prevăzută; (umplerea cu ulei se face de obicei numai în cazul rezultatelor pozitive ale încercărilor și măsurătorilor de la punctele a, b, c, d);

— măsurarea caracteristicilor de izolație cu determinarea valorii R_{60}/R_{15} și tg δ a înfășurărilor și determinarea tensiunilor de străpungere a uleiului, după 12 ore de la umplerea cuvei transformatorului cu ulei (la temperatura de minimum +10°C).

Condițiile de conectare fără uscare a transformatoarelor din grupa a V-a sînt:

a — transformatorul trebuie să fie ermetic închis;

b — în ulei nu trebuie să fie urme de apă; tensiunea de străpungere a uleiului trebuie să corespundă normelor indicate în tabelul 2.12.;

c — indicatorul cu silicagel trebuie să aibă culoarea albastru deschis sau indicatorul de umezeală, conform instrucțiunii de fabrică, nu trebuie să indice umezeală;

d — valoarea $\Delta C/C$ măsurată la sfîrșitul reviziei, nu trebuie să depășească valorile indicate în tabelul 2.18; în afară de aceasta, la creșterea valorii $\Delta C/C$ măsurările la sfîrșitul și începutul reviziei (raportate la aceeași temperatură) nu trebuie să depășească valorile indicate în tabelul 2.19;

e — valorile R_{60} și tg δ a înfășurărilor, măsurate după terminarea montajului și umplerea cu ulei, raportate la temperaturile măsurărilor din timpul montajului, nu trebuie să difere față de cele date în protocolul de fabrică cu mai mult de 30% în sensul înrăutățirii lor.

Pentru conectarea fără uscare prealabilă a transformatoarelor din grupa a V-a este suficientă respectarea uneia din următoarele combinații:

a, b, c, d, e, sau a, b, c, e

(dacă revizia părții active nu se face).

Scanned with OKEN Scanner

2.9. DEFECTE ŞI REGIMURI ANORMALE DE FUNCŢIONARE

După natura şi cauza lor defectele se manifestă prin următoarele fenomene ce atrag atenţia celui care supraveghează funcţionarea unui transformator:

— transformatorul se supraîncălzeşte;
— bîzîit anormal în transformator;
— trosnituri în interiorul transformatorului;
— străpungerea şi întreruperea bobinajelor;
— intrarea în funcţiune a protecţiei prin releu Buchholz;
— tensiunea în circuitul secundar al transformatorului nu este normală.

2.9.1. Supraîncălzirea transformatorului

Transformatorul este supraîncălzit. Se va controla transformatorul la funcţionarea în sarcină. La transformatoarele cu sarcină constantă se poate determina supraîncărcarea cu ampermetrul; la transformatoarele cu grafic de sarcină neuniform, supraîncărcarea se determină prin construirea graficului curentului care a străbătut transformatorul în decurs de 24 ore.

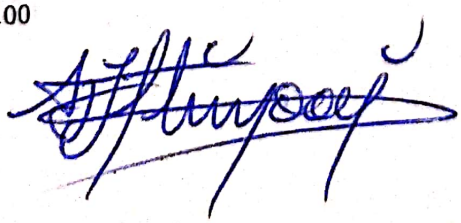
Trebuie să se ţină seama că transformatoarele permit supraîncărcări normale, în funcţie de graficul sarcinii şi temperatura mediului ambiant. În afară de aceasta, în cazuri excepţionale (în lipsa rezervei) se admite o supraîncărcare de avarie a transformatorului fără a ţine seama de sarcina anterioară şi de temperatura mediului ambiant (fără a se depăşi temperaturile admisibile ale părţilor componente şi a uleiului).

Se reduce sarcina transformatorului, conectînd în paralel cu acesta încă un transformator sau deconectînd consumatori de mai mică importanţă.

Temperatura în camera de lucru a transformatorului este prea mare. Se măsoară temperatura aerului în camera de lucru a transformatorului la distanţa de 1,5—2 m de cuva acestuia, la jumătatea înălţimii ei. Dacă această temperatură depăşeşte cu 8 . . . 10°C temperatura admisă, se va îmbunătăţi ventilaţia camerei de lucru a transformatorului. Pentru a asigura o ventilaţie normală a camerelor de lucru a transformatoarelor cu o putere egală sau mai mare de 1 000 kVA, se folosesc ţevi speciale de ventilaţie, montate în partea de sus a camerei pentru evacuarea aerului cald, iar jos se fac orificii corespunzătoare pentru intrarea aerului rece.

Orificiile de intrare şi de ieşire a aerului se închid cu grătare sau jaluzele. De obicei ventilaţia încăperilor transformatoarelor se calculează astfel ca diferenţa între temperatura aerului care intră (jos) şi a celui care iese (sus) să nu depăşească 15°C.

Nivelul uleiului în transformator este prea scăzut. În acest caz se observă că partea neacoperită a înfăşurărilor şi a oţelului activ se încălzesc excesiv.



Scanned with OKEN Scanner

Avînd certitudinea că uleiul din cuvă nu curge, aceasta se umple cu ulei pînă la nivelul normal.

Defecte interioare în transformator. Există scurtcircuit între spire, între faze, scurtcircuite datorite deteriorării izolației buloanelor care strîng oțelul activ al transformatorului, scurtcircuit între tolele miezului.

Toate aceste defecte, în cazul unor scurtcircuite neînsemnate, deși local temperatura este mare, nu produc totdeauna o creștere sensibilă a temperaturii generale. Numai intensificarea acestor defecte conduce la creșterea rapidă a temperaturii uleiului.

Transformatoarele care funcționează în paralel (circuite primare și secundare) au raportul de transformare diferit. În acest caz între ele va apărea un curent de egalizare. În sarcină, transformatorul a cărui tensiune secundară la funcționarea în gol este mai ridicată va prelua o sarcină mai mare.

Transformatoarele care funcționează în paralel au tensiuni de scurtcircuit diferite. În această situație sarcina se împarte între transformatoare în mod direct proporțional cu puterile nominale și invers proporțional cu tensiunile de scurtcircuit.

Respectarea următoarelor condiții de funcționare în paralel a transformatoarelor asigură distribuirea uniformă a sarcinii:

egalitatea (în limitele toleranțelor) a rapoartelor de transformare ($\pm 1\%$ pentru transformatoarele cu raportul de transformare sub 3 și $\pm 0{,}5\%$ pentru celelalte transformatoare);

egalitatea (în limitele toleranțelor) a tensiunilor de scurtcircuit ($\pm 10\%$ pentru toate transformatoarele);

transformatoarele să aparțină aceleiași grupe de conexiuni; se recomandă de asemenea ca raportul puterilor nominale ale transformatoarelor conectate în paralel să nu depășească 3 : 1.

Conectarea în paralel a transformatorului după montaj, după o reparație capitală, cu schimbarea înfășurărilor, sau după pozarea unui cablu nou, este admisă numai după identificarea fazelor.

2.9.2. Bîzîit anormal în transformator

S-a slăbit strîngerea tolelor miezului. Se strîng buloanele de presare a miezului.

S-a slăbit strîngerea pachetelor de tole la transformatoarele cu miezul țesut. Cu timpul, din cauza vibrației tolelor circuitului magnetic, s-a slăbit strîngerea tiranților verticali care presează coloanele cu jugul. Din această cauză s-a modificat întrefierul în rosturi, intensificîndu-se bîzîitul.

Se strînge miezul, schimbîndu-se garniturile jugurilor superior și inferior.

Vibrează tolele de capăt ale miezului. Se împănează tolele cu preșpan.

S-au slăbit buloanele care fixează capacul transformatorului și alte detalii. Se verifică strîngerea tuturor buloanelor.

Scanned with OKEN Scanner

Transformatorul este supraîncărcat sau sarcina pe faze este deosebit de nesimetrică. Se înlătură supraîncărcarea sau se reduce nesimetria sarcinii.

Există scurtcircuite între faze sau între spire. Se repară înfășurarea.

Transformatorul funcționează cu o tensiune ridicată. Se pune comutatorul de tensiune (dacă acesta există) în poziția corespunzătoare tensiunii ridicate.

2.9.3. Trosnituri în interiorul transformatorului

A avut loc o conturnare (însă nu străpungere). Între bobine sau între capetele de ieșire și cuvă se produce o conturnare datorită supratensiunilor. Se verifică și se repară înfășurarea.

S-a întrerupt legătura la pămînt. După cum se știe, oțelul masiv și alte piese ale circuitului magnetic al transformatorului se leagă la pămînt prin capacul transformatorului și cuvă. În felul acesta, sarcinile electrice care apar în aceste părți (înfășurările și părțile metalice ale circuitului magnetic formînd un condensator) se scurg în pămînt. În cazul întreruperii legăturii la pămînt pot apărea descărcări între bobinaj sau capetele de ieșire ale acestuia și cuvă, ceea ce conduce la zgomote sub formă de trosnituri în interiorul transformatorului.

Se reface legătura la pămînt așa cum a fost ea executată inițial de către fabrica furnizoare; conductorul de legare la pămînt se leagă în aceleași puncte și pe aceeași parte a transformatorului (de obicei pe partea înfășurării de joasă tensiune). Legătura la pămînt refăcută incomplet poate crea scurtcircuite.

2.9.4. Străpungerea înfășurărilor și întreruperi în înfășurări

Străpungerea între înfășurări și cuvă, între înfășurările de tensiune înaltă și joasă sau între faze. Cauzele pot fi:

au apărut supratensiuni datorită descărcărilor atmosferice, avariilor sau proceselor tranzitorii;

a scăzut mult calitatea uleiului (umezire, impurificare etc.);

a scăzut nivelul uleiului;

izolația este îmbătrînită;

în timpul scurtcircuitelor exterioare și de asemenea a celor din interiorul transformatorului au apărut eforturi electrodinamice.

Trebuie arătat că în cazul supratensiunilor pot să nu aibă loc străpungeri ale izolației, ci numai conturnări între înfășurări, între faze sau între înfășurări și cuvă. Ca rezultat al conturnării, de obicei, se topesc cîteva spire și se observă urme de carbonizare pe spirele alăturate, însă lipsește, ca atare, o legătură metalică între spire, între faze sau între înfășurări și cuvă.

Străpungerea izolației înfășurărilor se poate descoperi cu megohmmetrul. Însă, în unele cazuri, cînd datorită supratensiunii apar locuri ne-

Scanned with OKEN Scanner

izolate pe înfăşurări sub forma unor puncte (descărcare punctiformă), se poate descoperi defectul numai încercînd transformatorul sub tensiune (aplicată sau indusă).

Se repară şi la nevoie se schimbă înfăşurările.

Întreruperi în înfăşurări. Ca rezultat al întreruperii sau al unui contact imperfect se topeşte sau se arde o porţiune din conductorul înfăşurării.

Defectul se descoperă datorită degajării de gaz inflamabil în releul de gaz, care acţionează asupra semnalizării sau direct asupra circuitului de deconectare al întreruptorului transformatorului. Cauzele acestui defect pot fi:

este defectuos executată lipirea unor legături ale înfăşurărilor;

există deteriorări în conductoarele care leagă capetele înfăşurărilor cu bornele;

în cazul scurtcircuitelor, atît în interiorul cît şi în afara transformatorului, apar eforturi electrodinamice.

Întreruperile se pot constata cu ajutorul ampermetrelor sau al megohmmetrului.

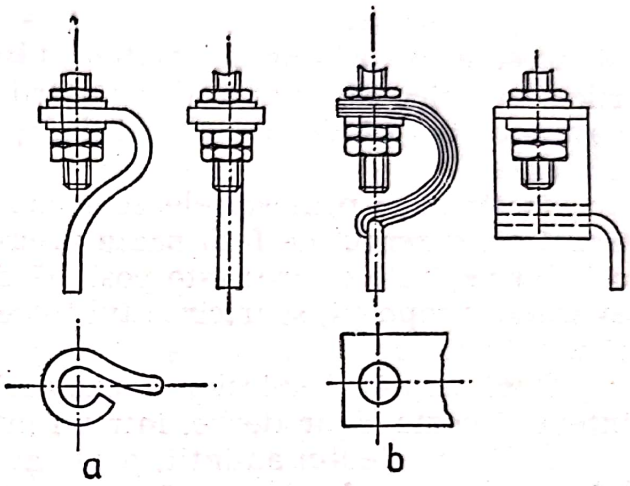


Fig. 2.36. Conectarea capetelor de ieşire: *a* — cu conductor rotund; *b* — cu benzi de cupru.

Locul întreruperii se poate găsi cu megohmmetrul, folosind la nevoie metoda aşa-numită a divizării înfăşurării. Întreruperea de cele mai multe ori se constată în locul de încovoiere a inelelor capetelor de ieşire sub şurub (figura 2.36, *a*).

Se repară înfăşurarea. Pentru a preîntîmpina întreruperile repetate în locurile de conectare la borne a înfăşurărilor, trebuie înlocuit conductorul rotund cu o legătură elastică de amortizare, care constă dintr-un pachet de benzi de cupru a cărui secţiune totală este egală cu secţiunea conductorului (figura 2.36, *b*).

2.9.5. Funcţionarea protecţiei prin releu Buchholz

Protecţia prin releu Bunchholz, după cum se ştie, este o protecţie sensibilă la defectele interioare sau la funcţionarea anormală a transformatorului. Această protecţie, în funcţie de intensitatea degajării de gaz, acţionează asupra semnalizării, asupra circuitului de deconectare al întreruptorului sau asupra ambelor în acelaşi timp. Intrarea în acţiune a releului Buchholz se explică prin situaţii şi cauze după cum urmează.

Protecţia prin releu Buchholz a acţionat asupra semnalizării deoarece:

Scanned with OKEN Scanner

în interiorul transformatorului au apărut defecte mici, care au condus la degajarea slabă de gaze;

în timpul umplerii sau curățirii uleiului a pătruns aer în transformator;

din cauza scăderii temperaturii sau datorită curgerii din cuvă, nivelul uleiului scade treptat.

Protecția prin releu Buchholz a acționat și la semnal și la deconectare sau numai la deconectare, din cauza defectelor interioare însoțite de o degajare intensă de gaz, deoarece s-a produs un scurtcircuit între spirele înfășurărilor primară sau secundară ale transformatorului.

Cauza acestui defect poate fi și o izolare insuficientă a legăturilor de trecere, deteriorarea izolației spirelor la presare, sau datorită bavurilor pe spira de cupru, deteriorării mecanice a izolației, degradării ei naturale, desprinderii izolației înfășurărilor în urma scăderii nivelului uleiului.

În timp ce prin spirele scurtcircuitate trece un curent de mare intensitate, curentul de fază poate să crească puțin; izolația spirelor și uneori chiar spirele se ard; este posibilă distrugerea spirelor învecinate. Dacă avaria ia proporții, scurtcircuitul între spire se poate transforma în scurtcircuit între faze.

Dacă numărul spirelor scurtcircuitate este mare, uleiul se încălzește intens și poate chiar fierbe, într-un interval de timp scurt.

În lipsa releului amintit, poate avea loc aruncarea uleiului și a fumului prin supape de siguranță, în cazul transformatoarelor cu puteri de la 1 000 kVA în sus.

Scurtcircuitul între spire se caracterizează nu numai prin încălzirea anormală a uleiului și o oarecare creștere a curentului de alimentare a transformatorului, dar și prin scăderea rezistenței active a fazei în care se produce scurtcircuitul.

S-a produs un scurtcircuit între faze care a evoluat foarte rapid (din aceleași cauze ca și străpungerea izolației); acesta poate fi însoțit de aruncarea uleiului prin conservator sau prin supapa de siguranță în cazul transformatoarelor cu puteri de la 1 000 kVA în sus.

S-a produs un scurtcircuit din cauza deteriorării izolației buloanelor de strîngere a miezului de oțel al transformatorului; piesele incluse în circuit se încălzesc excesiv, provocînd încălzirea uleiului; buloanele și tolele alăturate acestora se pot distruge.

La transformatoarele la care pachetele miezului de oțel sînt țesute prin întrepătrundere, se poate produce un scurtcircuit prin atingerea plăcilor de strîngere de coloane sau de juguri.

Există scurtcircuite între tolele miezului datorită deteriorării izolației între tole sau îmbătrînirii izolației.

Din această cauză apar curenții turbionari care produc încălziri locale intense ale miezului de oțel, ceea ce cu timpul poate conduce la deteriorarea locală a miezului. Pot avea loc încălziri excesive a interstițiilor în locurile de întrepătrundere a tolelor miezului, datorită curenților turbionari.

Scanned with OKEN Scanner

A scăzut mult nivelul uleiului în transformator sau se degajă intens aer din ulei, datorită răcirii bruște a lui sau în urma reparațiilor curente (umplerea cu ulei nou, curățirea uleiului prin centrifugare etc.).

Trebuie remarcat că în practică se observă de asemenea cazuri de semnalizări incorecte a protecției prin releu Buchholz din cauza defectării circuitelor secundare.

Deoarece impulsurile în circuitul de semnalizare al protecției prin releu Buchholz pot fi provocate de cauze foarte diferite, înainte de a trece la înlăturarea defectului este necesar să se stabilească precis cauza care a produs semnalizarea. Pentru aceasta se va clarifica care din protecțiile prin relee a acționat, analizîndu-se gazele colectate în releul Buchholz (inflamabilitatea, culoarea, cantitatea și compoziția chimică a lor).

Inflamabilitatea gazelor se determină prin apropierea unui chibrit aprins de robinetul superior, închis, al releului Buchholz și deschizînd apoi robinetul. Inflamabilitatea gazului indică prezența unui defect interior. Dacă gazele sînt incolore și nu ard, atunci cauza declanșării releului este aerul degajat din ulei.

Analizîndu-se culoarea gazului degajat se poate aprecia despre ce fel de defect este vorba; culoarea alb-gri a acestuia se datorește hîrtiei sau cartonului; galben — lemnului; negru — uleiului. Deoarece culoarea gazului poate să dispară după cîtva timp, este necesar ca ea să fie determinată imediat. După cantitatea de gaz colectată se poate aprecia proporția defectului. Scăderea temperaturii de inflamabilitate a uleiului de asemenea indică prezența unui defect interior.

În cazul în care releul Buchholz a acționat din cauza degajării aerului din ulei, este necesar ca aerul din releu să fie evacuat.

Cînd se completează uleiul trebuie avut grijă ca protecția să nu acționeze la deconectare. După terminarea umplerii cu ulei, cînd încetează degajarea aerului, se reintroduce protecția în circuitul de deconectare a transformatorului.

În cazul defectării înfășurărilor, este necesar să se găsească locul deteriorării și să se repare. Pentru aceasta se demontează transformatorul și se scoate schela cu înfășurările (partea decuvabilă). Spirele scurtcircuitate ale înfășurărilor se pot găsi prin alimentarea transformatorului cu o tensiune redusă, pe partea de joasă tensiune.

Locul scurtcircuitului este intens încălzit și bobinele fumegă.

Prin această metodă se pot găsi și alte scurtcircuite.

Porțiunile deteriorate în miezul de oțel pot fi găsite în timpul funcționării în gol a transformatorului decuvat; aceste locuri se vor încălzi intens. În acest sens tensiunea se aplică pe partea înfășurării de joasă tensiune și se ridică de la zero; înfășurarea de înaltă tensiune va fi în prealabil desfăcută în cîteva locuri pentru a se evita străpungerea acesteia ca urmare a faptului că nu este introdusă în ulei.

Scurtcircuitul între tolele miezului se poate înlătura prin revizuirea circuitului magnetic. Izolația deteriorată a circuitului magnetic se înlocuiește cu una nouă, după îndepărtarea celei vechi.

Scanned with OKEN Scanner

2.9.6. Tensiunea în circuitul secundar al transformatorului nu este normală

Cauzele acestui defect pot fi după cum urmează:

Tensiunile circuitului primar sînt egale; tensiunile circuitului secundar sînt egale la funcţionarea în gol, însă diferă puţin în sarcină; în acest caz:

există un contact imperfect la una din borne sau în interiorul înfăşurării la una din faze;

este întrerupt circuitul primar al transformatorului trifazat cu coloane, conectat după schema triunghi-stea sau triunghi-triunghi.

Tensiunile primare sînt egale; tensiunile secundare la funcţionarea în gol diferă mult de tensiunile secundare la funcţionarea în sarcină; în acest caz:

sînt inversate începutul şi sfîrşitul bobinei uneia din fazele circuitului secundar conectat în stea;

există o întrerupere în circuitul primar al transformatorului, conectat după schema stea-stea; suma vectorială a celor trei tensiuni de linie din circuitul secundar nu este egală cu zero;

există o întrerupere în circuitul secundar al transformatorului, în cazul conectării în stea-stea sau triunghi-stea; în această situaţie două din tensiunile de linie sînt egale cu zero; în cazul schemei triunghi-triunghi, întreruperea în circuitul secundar se poate găsi numai prin măsurarea rezistenţelor sau după încălzirea înfăşurării (bobina fazei care este întreruptă nefiind străbătută de curent va rămîne rece).

Este permisă funcţionarea temporară a transformatorului în două faze cu condiţia ca intensitatea curentului de sarcină să fie de maximum 58% din valoarea curentului nominal.

Pentru înlăturarea defectelor analizate care duc la nesimetria tensiunilor secundare ale transformatorului, este necesară repararea înfăşurării.

2.9.7. Alte defecte

Alte defecte ce pot apărea în funcţionarea transformatorului sînt cele cauzate de comutatorul de tensiune (ardere parţială sau totală a suprafeţelor, de către curent) şi de scurgerea uleiului din cuvă.

Modul de eliminare a acestor defecte este determinat de tipul constructiv al transformatorului.

Scanned with OKEN Scanner

3. MAŞINA ASINCRONĂ

3.1. PROPRIETĂŢILE PRINCIPALE ALE MAŞINII ASINCRONE

Pentru examinarea problemelor legate de diferite regimuri de funcţionare ale maşinii asincrone este necesar să se dea o scurtă prezentare a proprietăţilor principale ale acestei maşini [11, 15, 18, 23, 16, 57].

Sistemul reprezentat de înfăşurări fiind simetric, este suficient să se studieze o singură fază.

Schema echivalentă a maşinii asincrone este dată în fig. 3.1.

Diagrama de fazori a maşinii asincrone este reprezentată în fig. 3.2.

În locul schemei echivalente din fig. 3.1, se poate utiliza cu o bună aproximaţie schema echivalentă simplificată din fig. 3.3. care conţine două ramuri în paralel: una a circuitului magnetizant, alta a circuitului de lucru.

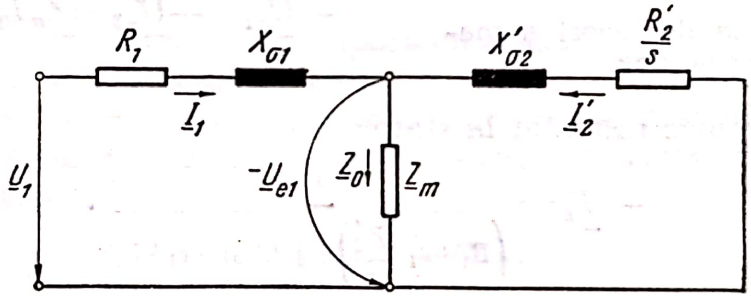


Fig. 3.1. Schema echivalentă a maşinii asincrone.

S-a folosit notaţia

$$c_1 = 1 + \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_m} \approx 1 + \frac{X_{\sigma 1}}{X_m}; \qquad (3.1)$$

impedanţa $\underline{Z}_{\sigma 1} = R_1 + jX_{\sigma 1}$ (unde $j = \sqrt{-1}$) reprezintă impedanţa statorului, iar

$\underline{Z}'_{\sigma 2} = \frac{R'_2}{s} + j X'_{\sigma 2}$ este impedanţa rotorului raportată la stator pentru o valoare s a alunecării;

$\underline{Z} = R_m + jX_m$ — impedanţa circuitului de magnetizare.

Rezistenţele R_1, R'_2, R_m, şi reactanţele $X_{\sigma 1}$, $X'_{\sigma 2}$, X_m se numesc parametrii electrici ai maşinii.

Scanned with OKEN Scanner

Parametrii mașinii nu au valori constante, ci depind în general de numeroși factori. În primul rînd, se poate considera că parametrii statorului sînt constanți, iar parametrii rotorului sînt dependenți de frecvența curentului din rotor, datorită fenomenului de refulare a curentului.

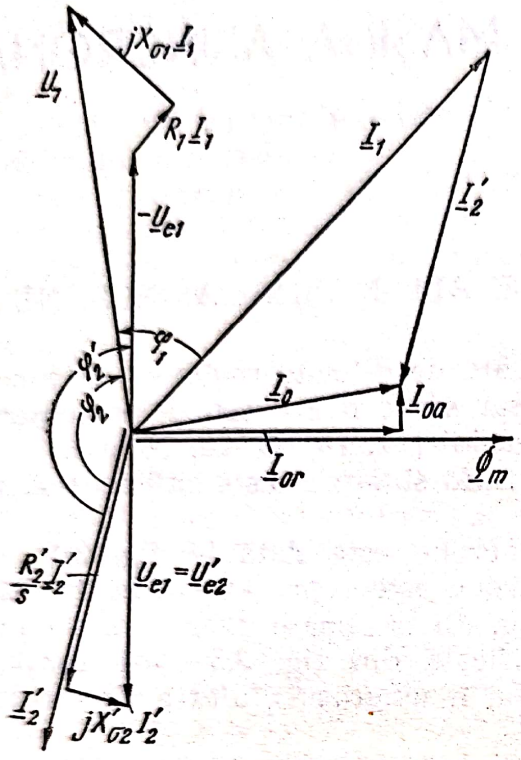


Fig. 3.2. Diagrama de fazori a mașinii asincrone.

Dacă rotorul este imobil, atunci frecvența curentului în rotor $f_2 = sf_1$ are valoarea maximă deoarece $s=1$; ca urmare, rezistența rotorului R_2 are valoarea maximă, iar reactanța de scăpări $X_{\sigma 2}$ are valoarea minimă.

Curentul din stator s-a notat cu $\underline{I}_1$; curentul din rotor raportat la stator cu $\underline{I}'_2$; curentul de magnetizare cu $\underline{I}_0$. Dacă rotorul este calat, atunci $s=1$, iar curentul $\underline{I}_1$ absorbit de mașină este denumit curentul de pornire sau curentul de scurtcircuit I_k.

Ecuațiile mașinii asincrone sînt:

$$\underline{U}_1 = (R_1 + jX_{\sigma 1})\underline{I}_1 - \underline{U}_{e1}; \tag{3.2 a}$$

$$0 = \left(\frac{R'_2}{s} + X'_{\sigma 2}\right)\underline{I}'_2 - \underline{U}'_{e2}; \tag{3.2 b}$$

$$-\underline{U}_{e1} = -\underline{U}'_{e2} = \underline{Z}_m\underline{I}_0 = \underline{Z}_m(\underline{I}_1 + \underline{I}'_2). \tag{3.2 c}$$

Curentul rotoric raportat la stator este

$$-\underline{I}'_2 = \frac{\underline{U}_1}{\left(R_1 + c_1\frac{R'_2}{s}\right) + j\,(X_{\sigma 1} + c_1 X'_{\sigma 2})}, \tag{3.3 a}$$

iar valoarea sa eficace

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + c_1\frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 X'_{\sigma 2})^2}}. \tag{3.3 b}$$

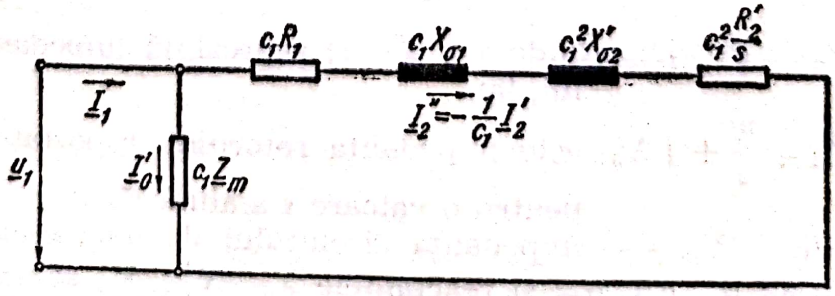


Fig. 3.3. Schema echivalentă simplificată a mașinii asincrone.

Scanned with OKEN Scanner

Curentul statoric este

$$\underline{I}_1 = \underline{I}'_2 + \underline{I}_0,$$

deci (v. fig. 3.2)

$$I_1 = \sqrt{(I'_2 \cos \varphi'_2 + I_{0a})^2 + (-I'_2 \sin \varphi'_2 + I_{0r})^2}. \tag{3.3c}$$

În mod simplificat se poate admite cu bună aproximație că I_{0a} se poate neglija în formulă, iar $\varphi'_2 \approx \varphi_2$ și deci

$$I_1 = \sqrt{(I'_2 \cos \varphi_2)^2 + (-I'_2 \sin \varphi_2 + I_{0r})^2}, \tag{3.3 d}$$

Considerăm că puterea absorbită de mașină de la rețea este $P = mU_1 I_1 \cos \varphi$, unde m este numărul de faze ale statorului (de obicei $m=3$). În acest caz puterea transmisă rotorului, denumită putere electromagnetică este

$$P_{em} = m \frac{R'_2}{s} I'^2_2 = mU_1^2 \frac{\frac{R'_2}{s}}{\left(R_1 + c_1 \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 X'_{\sigma 2})^2}. \tag{3.4}$$

Cuplul motor care acționează asupra rotorului, denumit cuplu electromagnetic se exprimă sub forma

$$M = \frac{1}{\Omega} P_{em}, \tag{3.4 a}$$

unde $\Omega = \frac{\omega}{p}$ este viteza unghiulară a cîmpului magnetic învîrtitor din întrefier în raport cu statorul;

$\omega = 2\pi f$ — pulsația rețelei;

p — numărul de perechi de poli ai mașinii.

De asemenea, în funcție de puterea care se transformă în putere mecanică, se obține

$$M = \frac{1}{\Omega_r} P_{mec}; \tag{3.4 b}$$

unde $\Omega_r = (1-s)\frac{\omega}{p}$ este viteza unghiulară a rotorului, iar

$$P_{mec} = P + P_{fr+v},$$

unde P este puterea utilă la arbore, și P_{fr+v} sînt pierderile mecanice prin frecare și ventilație.

Astfel,

$$M = \frac{mp}{\omega} \cdot \frac{R'_2}{s} I'^2_2 = \frac{mp}{\omega} U_1^2 \frac{\frac{R'_2}{s}}{\left(R_1 + c_1 \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 X'_{\sigma 2})^2}. \tag{3.5}$$

Pentru a obține cuplul în kgfm se împarte cuplul exprimat în Nm cu accelerația gravitației $g = 9{,}81$ m/s^2.

Scanned with OKEN Scanner

Cuplul maxim se obține pentru alunecarea

$$s_K = \pm \frac{c_1 R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 X_{\sigma 2}')^2}} \tag{3.6 a}$$

sau, dacă $R_1 \ll X_{\sigma 1}$ iar $c_1 \approx 1$,

$$s_K = \pm \frac{c_1 R_2'}{X_{\sigma 1} + c_1 X_{\sigma 2}'}, \tag{3.6 b}$$

unde se ia semnul plus pentru regim de motor și semnul minus pentru regim de generator.

Cuplul electromagnetic maxim, denumit și cuplul electromagnetic critic sau cuplul electromagnetic de răsturnare, este

$$M_K = \pm \frac{mp}{\omega} U_1^2 \frac{1}{2c_1 \left[\pm R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + c_1 X_{\sigma 2}')^2}\right]}; \tag{3.7 a}$$

semnele se adoptă ca și mai înainte.

Dacă $R_1 \ll X_{\sigma 1}$, iar $c_1 \approx 1$, se obține

$$M_K = \pm \frac{mp}{\omega} U_1^2 \frac{1}{2 (X_{\sigma 1} + c_1 X_{\sigma 2}')}. \tag{3.7 b}$$

De multe ori în calcule, ținînd seama că $R_1 \ll X_{\sigma 1}$, iar $c_1 \approx 1$, expresia cuplului electromagnetic se poate pune sub forma

$$\frac{M}{M_K} = \frac{2 + 2R_1 \frac{s_K}{c_1 R_2'}}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s} + 2R_1 \frac{s_K}{c_1 R_2'}} \approx \frac{2}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}}, \tag{3.8}$$

în care

$$s_K = \frac{R_2'}{X_k} = \frac{R_2'}{X_{\sigma 1} + X_2}, \tag{3.8 a}$$

sau, dacă se notează cu b raportul dintre cuplul maxim și cuplul nominal, atunci

$$\frac{M}{M_n} = \frac{2b}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}} \tag{3.9}$$

unde

$$b = \frac{M_K}{M_n} = mU_1^2 \frac{1}{2c_1 P_{emn} \left[R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 X_{\sigma 2}')^2}\right]} \tag{3.9 a}$$

iar $P_{em\,n}$ este puterea electromagnetică la sarcină nominală, adică la valoarea nominală s_n a alunecării (s-a considerat numai regimul de motor).

Scanned with OKEN Scanner

Astfel,

$$(1-s)\,P_{em\,n}=P_{mec}=P_n+P_{fr+v}. \qquad (3.9\text{ b})$$

adică puterea mecanică la sarcină nominală este egală cu suma dintre puterea nominală la arborele motorului (adică puterea utilă) și pierderile mecanice.

Ținînd seama de relațiile (3.4 b) și (3.9 b), relația (3.9 a) devine

$$b=mU_1^2\,\frac{(1-s)}{2c_1(P_n+P_{fr+v})\left[R_1+\sqrt{R_1^2+(X_{\sigma 1}+c_1X'_{\sigma 2})^2}\right]}. \qquad (3.9\text{ c})$$

Se va nota b_n valoarea lui b pentru tensiunea nominală și frecvența nominală.

Dacă rotorul este calat, atunci $s=1$ și impedanța ramurii de lucru este $\underline{Z}_k=\underline{Z}_{\sigma 1}+\underline{Z}'_{\sigma 2}$ și se numește impedanță de scurtcircuit. La un motor asincron cu rotorul calat impedanța înfășurării statorului este practic egală cu impedanța înfășurării rotorului:

$$\underline{Z}_{\sigma 1}\approx\underline{Z}'_{\sigma 2}$$

și atunci

$$\underline{Z}_{\sigma 1}\approx\frac{1}{2}\underline{Z}_k,$$

iar

$$c_1=1+\frac{\underline{Z}_{\sigma 1}}{\underline{Z}_m}\approx 1+\frac{Z_k}{2Z_m}\approx 1+\frac{I_0}{2I_k}. \qquad (3.10)$$

Valorile medii ale curentului de funcționare în gol și ale curentului de pornire sînt: $I_0=0{,}3\ I_n$; $I_k=5\ I_n$ și deci

$$c_1\approx 1+\frac{0{,}3}{10}=1{,}03;$$

rezultă că valoarea coeficientului c_1 este în general foarte apropiată de unitate.

După cum rezultă din expresia (3.5), la alunecări mici cuprinse între $s=0$ și $s=s_K$, cuplurile sau puterile electromagnetice sînt proporționale cu alunecările,

$$\frac{M_1}{M_2}\approx\frac{P_{em1}}{P_{em2}}\approx\frac{s_1}{s_2}. \qquad (3.11)$$

În fig. 3.4 sînt reprezentate curbele cuplului electromagnetic ale unui motor asincron în funcție de alunecare sau de turație, pentru diferite valori ale alunecării critice.

Alunecarea critică la care se obține cuplul maxim, la motoarele obișnuite, este de aproximativ 10—15%.

Regimul staționar de funcționare a motorului se realizează pentru alunecarea s la care cuplul electromagnetic este egal cu cuplul static rezistent la arbore.

Scanned with OKEN Scanner

Cuplul rezistent la arbore este dat de suma dintre cuplul rezistent exterior şi cuplul datorit pierderilor. Alunecarea nominală se determină la intersecţia dintre curba cuplului electromagnetic $M=f_1(s)$ şi curba cuplului static rezistent la arbore $M_{st}=f_2(s)$. Se poate admite că ultima

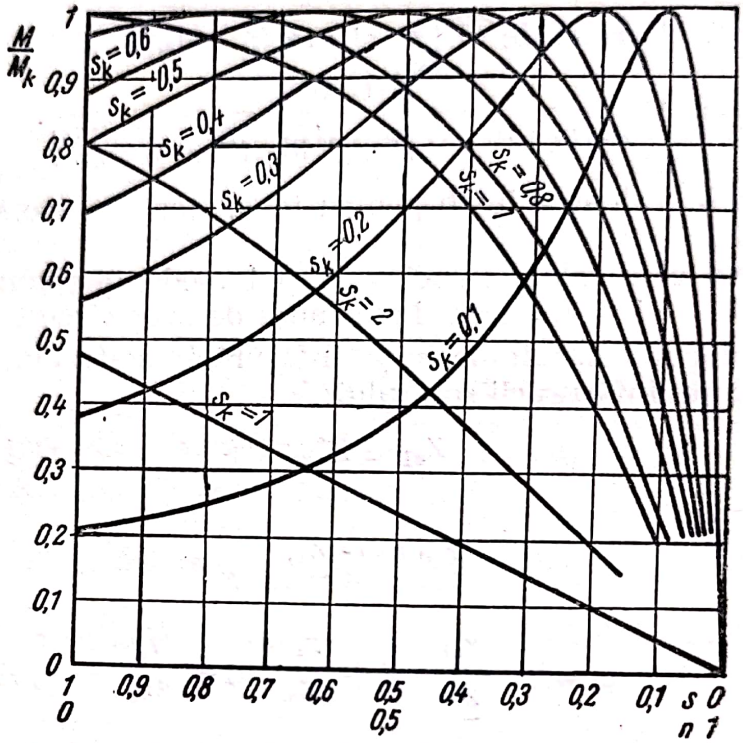


Fig. 3.4. Curbele cuplului electromagnetic al unui motor asincron în funcţie de alunecare sau turaţie, pentru diferite valori ale alunecării critice.

curbă este foarte apropiată de curba cuplului rezistent exterior. Pentru ca regimul de funcţionare să fie stabil este necesar ca în punctul de intersecţie a celor două curbe $M=f_1(s)$ şi $M_{st}=f_2(s)$ să fie satisfăcută relaţia

$$\frac{dM}{ds} \geqslant \frac{dM_{st}}{ds}. \qquad (3.12)$$

3.2. DETERMINAREA PARAMETRILOR ELECTRICI AI MAŞINII ASINCRONE UTILIZÎND DATELE DIN CATALOGUL MAŞINII

Pentru soluţionarea a numeroase probleme referitoare la diferite regimuri de funcţionare normală şi anormală a maşinii asincrone, este necesar să se cunoască parametrii maşinii asincrone. Aceştia nu sînt indicaţi nici pe placa indicatoare a maşinii şi nici în catalogul maşinii. Valorile parametrilor pot fi însă determinate cu ajutorul datelor din catalog.

Avînd în vedere că parametrii rotorici depind de curent, este necesar să se determine atît valorile parametrilor pentru frecvență mare în rotor cît și valorile parametrilor pentru frecvență mică. Se urmărește să se determine: R_1; $R_2'(s=1)$; $R_2'(s\approx s_n)$; $X_{\sigma 1}+c_1X_{\sigma 2}'(s=1)$; $X_{\sigma 1}+c_1X_{\sigma 2}'(s\approx s_n)$.

Se va începe cu determinarea parametrilor pentru cazul rotorului imobil, deci pentru cazul cînd frecvența este maximă.

În catalog se dă raportul dintre cuplul de pornire și cuplul nominal $m_p=\frac{M_p}{M_n}$ și de asemenea raportul dintre curentul de pornire și curentul nominal din stator $k=\frac{I_p}{I_{1n}}$ pentru alimentarea la tensiune nominală,

Din raportul curenților, rezultă imediat impedanța pe fază a motorului cu rotorul imobil ($s=1$)

$$Z=\frac{U_{1n}}{\sqrt{3}I_p}=\frac{U_{1n}}{\sqrt{3}kI_{1n}} \tag{3.13}$$

unde U_{1n} este valoarea eficace a tensiunii de linie a statorului.

Din raportul cuplurilor, ținînd seama de relația (3.5), rezultă pentru $s=1$

$$m_p=\frac{M_p}{M_n}=\frac{\frac{mp}{\omega}R_2'I_{2p}'^2}{M_n};$$

dar după relația (3.4 b) se obține

$$M_n=\frac{mp}{\omega}\cdot\frac{1}{1-s_n}(P_n+P_{fr+v})$$

și deci

$$m_p=\frac{M_p}{M_n}=\frac{mR_2'I_{2p}'^2(1-s_n)}{P_n+P_{fr+v}}.$$

Rezultă:

$$R_2'(s=1)=\frac{(P_n+P_{fr+v})\,m_p}{m(1-s_n)I_{2p}'^2}\approx\frac{(P_n+P_{fr+v})\,m_p}{m(1-s_n)k^2I_{1n}^2}, \tag{3.14}$$

unde s-a admis aproximația că $I_{2p}'=kI_{1n}$, adică s-a scris relația dintre curentul din primar și curentul din secundar neglijînd la pornire curentul de magnetizare.

Reactanța la $s=1$ se poate obține ușor dacă se neglijează curentul de magnetizare, ceea ce este acceptabil deoarece la $s=1$ impedanța Z_m este mult mai mare decît Z_2'. Deci:

$$X_k(s=1)\approx X_1+c_1X_{\sigma 2}'(s=1)=\sqrt{Z_{k1}^2-R_{k1}^2}, \tag{3.15}$$

unde

$$R_{k1}=R_1+R_2'(s=1); \tag{3.15a}$$

Scanned with OKEN Scanner

rezistența unei faze a statorului este de regulă, indicată în catalog; dacă lipsește, se poate adopta într-o primă aproximație $R_1 = R_2'(s \approx s_n)$, iar $R_2'(s \approx s_n)$ va fi calculată mai departe.

Se vor determina acum parametrii pentru cazul cînd frecvența este mică și anume pentru alunecarea nominală.

Raportul între cuplul maxim și cuplul nominal la tensiune și frecvență nominale este dat de relația (3.9 c):

$$b_n \approx m U_{1n}^2 \frac{1 - s_n}{2c_1 (P_n + P_{fr+v}) \left[R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 X'_{\sigma 2})^2} \right]} \tag{3.15b}$$

sau, dacă se neglijează R_1^2 față de $(X_{\sigma 1} + c_1 X'_{\sigma 2})^2$, se obține

$$b_n \approx m U_{1n}^2 \frac{1 - s_n}{2c_1 (P_n + P_{fr+v}) \left[R_1 + (X_{\sigma 1} + c_1 X'_{\sigma 2}) \right]}. \tag{3.15c}$$

Așadar,

$$X_{\sigma 1} + c_1 X'_{\sigma 2}(s \approx s_n) = m U_{1n}^2 \frac{1 - s_n}{2c_1 (P_n + P_{fr+v})} \cdot \frac{1}{b_n} - R_1. \tag{3.16}$$

Admițînd că valoarea maximă a cuplului se realizează în zona alunecărilor mici, se poate scrie conform relației (3.6b)

$$R_2' (s \approx s_n) = \frac{1}{c_1} s_K [X_{\sigma 1} + c_1 X'_{\sigma 2}(s \approx s_n)]. \tag{3.17a}$$

Din expresia (3.9) se obține la sarcina nominală, pentru tensiunea și frecvența nominală, relația

$$\frac{M_n}{M_n} = 1 = \frac{2b_n}{\frac{s_n}{s_K} + \frac{s_K}{s_n}}$$

în care

$$b_n = \frac{M_k}{M_n} \quad \text{la } f = f_n \text{ și } U = U_n,$$

deci

$$\frac{s_K}{s_n} = b_n + \sqrt{b_n^2 - 1}. \tag{3.17 b}$$

Dacă în expresia (3.3 a) a curentului I_2' se neglijează R_1, atunci unghiul φ_2 din fig. 3.2 și din relația (3.3 c), pentru regim nominal și $c_1 \approx 1$, se poate exprima în mod convenabil utilizînd relația (3.17 b):

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{s_n}{s_K} = \frac{1}{b_n + \sqrt{b_n^2 - 1}}. \tag{3.16 c}$$

Din relațiile (3.17a) și (3.17b) se obține

$$R_2'(s \approx s_n) = \frac{1}{c_1} s_n [X_{\sigma 1} + c_1 X'_{\sigma 2} (s \approx s_n)] (b_n + \sqrt{b_n^2 - 1}). \tag{3.18}$$

Scanned with OKEN Scanner

În cazul în care nu se cunoaște rezistențe rotorului și se admite $R_1=R'_2(s\approx s_n)$, atunci din relațiile (3.16) și (3.18) rezultă

$$R'_2(s\approx s_n)=mU_{2n}^2\frac{1-s_n}{2c_1\,(P_n+P_{fr+v})\,b_n\left[1+\frac{c_1}{s_n\,(b_n+\sqrt{b_n^2-1})}\right]}. \qquad (3.19)$$

Dacă se cere să se separe reactanța statorică de cea rotorică, se admite că

$$X_{\sigma 1}=X'_{\sigma 2}(s\approx s_n),$$

deoarece refularea curentului la stator este mai mică decît la rotor, conductoarele statorice fiind divizate, adică într-o crestătură se află un număr mare de conductoare izolate între ele.

Dacă frecvența curentului din rotor scade, rezistența rotorului scade de asemenea, iar reactanța de scăpări crește.

La valori mici ale alunecării, ca de exemplu la cele corespunzătoare funcționării în regim normal, rezistența rotorului va fi practic egală cu rezistența în curent continuu.

Exemplu. Se dă un motor cu următoarele date: 875 kW; 6 kV; 100 A; $\cos\varphi_n=0{,}88$; $n=985$ rot/min; $f=50$ Hz; $\frac{I_p}{I_n}=5{,}5$; $\frac{M_p}{M_n}=1{,}2$; $b_n=\frac{M_k}{M_n}=2{,}6$; $m=3$ faze.

Se cer parametrii electrici ai motorului. Se va admite $c_1=1{,}03$ și $P_{fr+v}=(1\%)\,P_n=0{,}01\,P_n=8{,}75$ kW ≈ 9kW.

Deci

$$P_n+P_{fr+v}=884 \text{ kW}.$$

Turația de sincronism este $n_1=1\,000$ rit/min. Alunecarea nominală rezultă imediat

$$s=\frac{n_1-n}{n_1}=\frac{1\,000-985}{1\,000}=0{,}015.$$

Rezistența rotorului raportată la stator pentru alunecare $s=1$ se determină cu relația (3.14):

$$R'_2(s=1)=\frac{884\cdot 10^3\cdot 1{,}2}{3\,(1-0{,}015)\,100^2\cdot 5{,}5^2}=1{,}186\ \Omega.$$

Rezistența rotorului raportată la stator pentru alunecări mici și anume pentru alunecarea nominală $s=s_n$ se va determina cu relația (3.19):

$$R'_2(s\approx s_n)=3\left(\frac{6\,000}{\sqrt{3}}\right)^2\frac{1-0{,}015}{2\cdot 1{,}03\cdot 884\cdot 10^3\cdot 2{,}6\left[1+\frac{1{,}03}{0{,}015\left[2{,}6+\sqrt{(2{,}6)^2-1}\right]}\right]}=0{,}508\ \Omega.$$

Se vede că la alunecări mici rezistența rotorului este mai mică decît la alunecări mari, din cauza efectului refulării curentului, fenomen manifestat mai slab la alunecări mici.

Scanned with OKEN Scanner

S-a admis aproximația că:

$$R_1 = R_2' \ (s \approx s_n) = 0{,}508 \ \Omega.$$

În acest caz reactanța pentru alunecări mici se poate determina cu relația (3.16):

$$X_{\sigma 1} + c_1 X_{\sigma 2}' \ (s \approx s_n) = 3 \left(\frac{6\,000}{\sqrt{3}} \right)^2 \frac{1 - 0{,}015}{2 \cdot 1{,}03 \cdot 884 \cdot 10^3 \cdot 2{,}6} - 0{,}508 = 6.980 \ \Omega.$$

Impedanța totală pentru $s=1$ se calculează cu relația (3.13):

$$Z_{k1} = \frac{6\,000}{\sqrt{3} \cdot 100 \cdot 5{,}5} = 6{,}238 \ \Omega.$$

Rezistența totală se poate calcula cu relația (3.15 a);

$$R_{k1} = 0{,}508 + 1{,}186 = 1{,}694 \ \Omega$$

Reactanța pentru alunecarea $s=1$ se va determina cu relația (3,15);

$$X_{\sigma 1} + c_1 X_{\sigma 2}' \ (s=1) = \sqrt{(6{,}288)^2 - (1{,}71)^2} = 6{,}065 \ \Omega.$$

3.3. DETERMINAREA PARAMETRILOR ELECTRICI AI MAȘINII ASINCRONE UTILIZÎND ÎNCERCĂRILE DE FUNCȚIONARE ÎN GOL, SCURTCIRCUIT ȘI SARCINĂ

Pentru a determina parametrii electrici ai mașinii asincrone din datele încercărilor experimentale este necesar să se efectueze următoarele încercări:

— măsurarea în curent continuu a rezistenței înfășurării statorului, iar la mașinile cu rotorul bobinat și a rotorului;

— încercarea de scurtcircuit;

— încercarea în gol;

— încercarea de sarcină.

3.3.1. Determinarea rezistenței de fază a înfășurării statorului

Măsurarea rezistenței înfășurării se poate face fie prin metoda punții duble, fie prin metoda voltmetrului și ampermetrului.

3.3.2. Determinarea parametrilor electrici pentru valori mari ale alunecării

Încercarea de scurtcircuit se poate face atît la tensiune nominală, cît și la tensiune redusă. Este însă recomandabil ca această încercare să se facă la tensiunea nominală sau la o tensiune apropiată, deoarece para-

Scanned with OKEN Scanner

metrii depind de intensitatea curentului și de tensiune; rezistențele se determină prin intermediul temperaturii lor, iar reactanțele prin intermediul măsurării saturației. Efectuarea acestei încercări la tensiune nominală, nu este însă totdeauna posibilă, deoarece se poate întîmpla ca valoarea curentului să fie periculoasă pentru mașină sau pentru rețea, dacă funcționarea în scurtcircuit durează mai mult.

Încercarea de scurtcircuit se poate face atît cu alimentare trifazată, cît și cu alimentare în două faze a statorului. În ultimul caz schema de încercare este mai simplă deoarece necesită numai un voltmetru, un ampermetru și un wattmetru, iar posibilitățile de a greși la montaj sau determinări sînt mai mici.

Exactitatea încercării este însă mai mică, deoarece condițiile se depărtează de cele reale, cînd mașina este alimentată în trifazat, totuși gradul de precizie pentru scopul urmărit este satisfăcător.

La încercarea de scurtcircuit trebuie să se aibă în vedere ca bobina de tensiune a wattmetrului și voltmetrul să fie conectate direct la bornele mașinii. În caz că nu se respectă această recomandare, pot apărea erori (de exemplu, rezistența bobinei ampermetrului și rezistența bobinei de curent a wattmetrului pot apărea incluse în valoarea măsurată pentru rezistența înfășurării).

În cazul încercării efectuate cu alimentare trifazată se măsoară: curentul de linie din stator I_k; puterea activă absorbită de la rețea P_k; tensiunea de linie U_k.

Rezultă rezistența totală pe fază

$$R_k(s=1)=\frac{P_k}{3\,I_k^2}; \tag{3.20}$$

Dacă este necesar să se separe rezistența primară și secundară, se scrie

$$R_2'(s=1)=R_k-k_f R_1, \tag{3.20a}$$

unde k_f este un coeficient, prin care se ia în considerare mărirea rezistenței statorului în curent alternativ și se poate adopta în general cu destulă exactitate că $k_f=1{,}05$.

Impedanța totală a motorului la alunecare $s=1$ este

$$Z_k(s=1)=\frac{U_k}{\sqrt{3}\,I_k} \tag{3.21}$$

iar reactanța totală

$$X_{\sigma 1}+c_1 X'_{\sigma 2}(s=1)\approx X_k(s=1)=\sqrt{Z_k^2-R_k^2}. \tag{3.22}$$

La calculul rezistenței și reactanței cu relațiile (3.20a) și (3.22) se neglijează efectul curentului de magnetizare.

Dacă bobinajul din statorul mașinii are conexiunea în stea, atunci relațiile (3.20) și (3.21) dau rezistența și impedanța de fază. Dacă conexiunea este în triunghi, atunci rezistența și impedanța de fază sînt de trei ori mai mari decît valorile obținute cu relațiile (3.20) și (3.21).

În cazul încercării monofazate, adică cu alimentare pe două faze, se obține pentru cele trei perechi de faze: U_{k12}, U_{k23}, U_{k31}, I_{k12}, I_{k23}, I_{k31}, P_{k12}, P_{k23}, P_{k31} și rezultă rezistențele și impedanțele R_{k1}, R_{k2}; R_{k3}; Z_{k1}; Z_{k2}; Z_{k3} calculate cu relațiile:

$$R_{k12}=\frac{P_{k12}}{2I_{kn}};\quad Z_{k12}=\frac{U_{k12}}{2I_{k1}^2}\quad \text{etc.}$$

Se obțin valorile:

$$R_k(s=1)=\frac{R_{k12}+R_{k23}+R_{k31}}{3};$$

$$Z_k(s=1)=\frac{Z_{k12}+Z_{k23}+Z_{k31}}{3};$$

$$X_k(s=1)=\sqrt{Z_k^2-R_k^2}.$$

3.3.3. Determinarea parametrilor electrici la valori mici ale alunecării

Rezistența la valori mici ale alunecării rezultă din datele încercării în sarcină. La încercarea în sarcină se măsoară puterea absorbită de la rețea P_1, curentul statoric I_1, alunecarea s. Din aceste date se poate calcula puterea electromagnetică. Pentru aceasta este necesar ca din puterea absorbită P_1 să se scadă pierderile în cuprul înfășurării statorului $P_{\text{Cu }1}$ și pierderile în oțelul statorului $P_{\text{Fe }1}$. Pierderile în cuprul statorului pot fi calculate, deoarece se cunoaște R_1 și I_1, cu relația:

$$P_{\text{Cu }1}=mR_1I_1^2. \tag{3.23}$$

Pierderile în oțelul statorului pot fi considerate practic egale cu pierderile în oțel $P_{\text{Fe }0}$ determinate la încercarea de funcționare în gol

$$P_{\text{Fe }1}=P_{\text{Fe }0}$$

deci puterea electromagnetică este

$$P_{em}=P_1-P_{\text{Cu }1}-P_{\text{Fe }1}. \tag{3.24}$$

Dacă încercarea în sarcină se face la regim nominal, iar pierderile în înfășurarea rotorului sînt mici față de pierderile totale, atunci se poate scrie cu aproximație

$$P_{em}=P_{em\,n}\approx\eta_nP_1. \tag{3.24a}$$

Notăm

$$m_c=\frac{P_{em}}{P_{em\,n}}=\frac{M}{M_n}, \tag{3.25}$$

unde P_{em} reprezintă puterea electromagnetică în regimul la care s-a făcut încercarea, iar $P_{em\,n}$ reprezintă puterea electromagnetică în regim nomi-

Scanned with OKEN Scanner

nal. Cu notațiile (3.25), relația (3.9) dă pentru cazul valorilor nominale ale tensiunii și frecvenței, adică pentru $b=b_n$ unde

$$b_n=\frac{M_k}{M_n}\ (\text{la } f=f_n \text{ și } U=U_n),$$

$$m_c=\frac{2b_n}{\frac{s}{s_K}+\frac{s_K}{s}}$$

sau

$$m_c\left(\frac{s_K}{s}\right)^2-2b_n\frac{s_K}{s}+m_c=0.$$

Rezultă

$$s=\frac{s_K}{\frac{b_n}{m_c}+\sqrt{\left(\frac{b_n}{m_c}\right)^2-1}}. \tag{3.26}$$

Considerînd că valoarea maximă a cuplului se realizează în zona alunecărilor mici, urmează că în baza relației (3.6a) se poate scrie

$$R_2'(s\approx s_n)=\frac{1}{c_1}s_K\sqrt{R_1^2+(X_{\sigma 1}+c_1X_{\sigma 2}')^2},$$

sau, înlocuind pe s_K dat de relația (3.26),

$$R_2'(s\approx s_n)=\frac{1}{c_1}s\sqrt{R_1^2+[X_{\sigma 1}+c_1X_{\sigma 2}'(s\approx s_n)]^2}\left[\frac{b_n}{m_c}+\sqrt{\left(\frac{b_n}{m_c}\right)^2-1}\right]. \tag{3.27}$$

Dacă $\frac{b_n}{m_c}\geqslant 1{,}6$, atunci expresia din paranteza dreaptă cuprinsă în relația (3.27) se poate scrie

$$\frac{b_n}{m_c}+\sqrt{\left(\frac{b_n}{m_c}\right)^2-1}\approx 2\frac{b_n}{m_c}$$

și astfel expresia (3.27) devine

$$R_2'(s\approx s_n)=\frac{1}{c_1}s\left(\sqrt{R_1'+[X_{\sigma 1}+c_1X_{\sigma 2}'(s\approx s_n)]^2}\right)2\frac{b_n}{m_c}$$

sau, înlocuind pe b_n cu expresia (3.15b)

$$R_2'(s\approx s_n)=mU_{1n}^2\frac{s(1-s_n)}{m_c c_1^2(P_n+P_{fr+v})}\cdot\frac{\sqrt{R_1^2+[X_{\sigma 1}+c_1X_{\sigma 2}'(s\approx s_n)]^2}}{R_1+\sqrt{R_1^2+[X_{\sigma 1}+c_1X_{\sigma 2}'(s\approx s_n)]^2}}.$$

Dar ultima fracție poate fi pusă cu o bună aproximație sub forma

$$\frac{\sqrt{R_1^2+[X_{\sigma 1}+c_1X_{\sigma 2}'(s\approx s_n)]^2}}{R_1+\sqrt{R_1^2+[X_{\sigma 1}+c_1X_{\sigma 2}'(s\approx s_n)]^2}}\approx\frac{X_{\sigma 1}+c_1X_{\sigma 2}'(s\approx s_n)}{R_1+X_{\sigma 1}+c_1X_{\sigma 2}'(s\approx s_n)}\approx\frac{X_k(s=1)}{R_1+X_k(s=1)}.$$

Scanned with OKEN Scanner

Deci

$$R_2'(s\approx s_n) \approx mU_{1n}^2 \frac{s\ (1-s_n)X_k\ (s=1)}{c_1^2 m_c (P_n+R_{fr+v})[R_1+X_k\ (s=1)]}; \qquad (3.28)$$

Este posibil şi un calcul simplificat.

Astfel, pentru $b_n \geqslant 1.6$ se obţine din relaţia (3.17 b)

$$s_n \approx \frac{s_K}{2\ b_n};$$

dar alunecarea critică se poate calcula cu relaţia (3.6 b) şi se obţine:

$$s_K(s=1) = \frac{c_1 R_2'(s=1)}{X_{\sigma 1}+c_1 X_{\sigma 2}'(s=1)},$$

dacă se introduc parametrii pentru $s=1$, sau

$$s_K\ (s\approx s_n) = \frac{c_1 R_2'(s\approx s_n)}{X_{\sigma 1}+c_1 X_{\sigma 2}'(s\approx s_n)},$$

dacă se introduc parametrii pentru alunecării mici.

Din ultimele relaţii rezultă

$$s_{n1} = \frac{R_2'\ (s=1)}{2b_n\ (s=1)\ [X_{\sigma 1}+c_1 X_{\sigma 2}'(s=1)]}$$

$$s_n = \frac{R_2'\ (s\approx s_n)}{2b_n\ (s\approx s_n)\ [X_{\sigma 1}+c_1 X'_{\sigma 2}\ (s\approx s_n)]}.$$

Coeficientul b se calculează cu formula (3.9 a). Presupunînd că se introduc succesiv parametrii calculaţi pentru $s=1$ şi pentru $s\approx s_n$ şi că se neglijează R_1, iar pentru $P_{em\,n}$ se ia aceeaşi valoare, rezultă

$$\frac{b_n\ (s=1)}{b_n\ (s\approx s_n)} \approx \frac{X_{\sigma 1}+c_1 X_{\sigma 2}'\ (s\approx s_n)}{X_{\sigma 1}+c_1 X_{\sigma 2}'\ (s=1)};$$

Din ultimele trei relaţii se obţine

$$R_2'\ (s\approx s_n) = \frac{s_n}{s_{n1}} R_2'\ (s=1) \qquad (3.28a)$$

unde s_n este alunecarea calculată cu parametrii corèspunzători alunecărilor mici, iar s_{n1} este alunecarea calculată cu parametrii corespunzători alunecării $s=1$. Alunecarea s_n rezultă cunoscînd turaţia nominală a motorului, iar alunecarea s_{n1} poate fi calculată cu relaţia (3.26) cunoscînd b_n şi m_c.

De asemenea, din încercările efectuate se poate determina puterea reactivă absorbită de motor de la reţea la funcţionarea în sarcină, utilizînd expresiile puterii active, reactive şi aparente.

Pentru funcţionarea în sarcină se poate scrie

$$\cos\varphi_n = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{3}\,U_1 I_1}$$

$$Q_n = \sqrt{3}\,U_1 I_1 \sin\varphi_n.$$

Pentru funcţionarea în gol,

$$Q_0 = \sqrt{3}\,UI_0 \sin\varphi_0 \approx \sqrt{3}\,UI_0.$$

Scanned with OKEN Scanner

3.4. CONSTRUIREA CURBEI CUPLULUI $M=f(s)$

Curba cuplului poate fi ridicată experimental în modul cunoscut din încercările mașinilor electrice, sau poate fi construită cunoscînd parametrii mașinii, care de asemenea pot fi determinați din încercări experimentale sau din datele catalogului. Se va considera că se cunosc parametrii mașinii atît pentru valori mari cît și pentru valori mici ale alunecării.

Mărimile care determină valoarea cuplului maxim sînt rezistența și reactanța motorului care, după cum se cunoaște, nu au în cele mai multe cazuri valori constante, ci depind de o serie de factori în special de refularea curentului și variază cu alunecarea. Astfel după cum s-a arătat, la pornire deoarece alunecarea este maximă ($s=1$), rezistența are valoarea cea mai mare, iar reactanța de scăpări raportată la frecvența rețelei are valoarea cea mai mică. Invers, la valori mici ale alunecării, rezistența scade iar reactanța de scăpări crește. Rezistența variază în special cu alunecarea.

Variația parametrilor electrici ai rotorului în funcție de alunecare la motoarele cu colivie rotorică simplă, de tip obișnuit, sau la motoarele cu rotorul bobinat, nu este mare. În schimb la motoarele cu rotoarele cu dublă colivie sau cu bare înalte, această variație este deosebit de mare.

Curba cuplului, considerînd rezistența constantă, va fi totdeauna diferită de curba reală; în unele cazuri diferența poate fi foarte mare, chiar pentru motoarele cu rotorul bobinat.

Pentru a construi o curbă a cuplului cît mai apropiată de cea reală este necesar să se țină seama de variația parametrilor rotorului în funcție de alunecare. Cunoscînd relația de dependență dintre parametri și alunecare, se procedează la construcția curbei. Pentru fiecare valoare a alunecării se calculează parametrii mașinii și se calculează cuplul cu formula (3.8).

Dacă relația dintre parametrii rotorici și alunecare nu este cunoscută, se procedează după cum urmează. Se calculează parametrii mașinii pentru alunecarea $s=1$ și pentru $s\approx s_n$, apoi se construiesc două curbe: una $M_1=f_1(s)$ cu valorile parametrilor determinate pentru $s=1$, alta $M_2=f_2(s)$ cu valorile parametrilor determinate pentru $s\approx s_n$.

Curba reală coincide în zona alunecărilor mari cu prima curbă, în zona alunecărilor mici cu a doua curbă, iar în zona alunecărilor intermediare are o alură intermediară între cele două curbe. Într-o reprezentare foarte simplificată, se trasează curba cuplului cunoscînd numai următoarele puncte, care se dau în general în catalog și anume $s=0$; $M=0$; $s=s_n$; $M=M_n$; $s=s_K$; $M=M_K$; $s=1$; $M=M_p$.

Exemplu. Se dă motorul asincron cu următoarele date nominale:

$P_n=500$ kW; $U_n=6\,000$ V (tensiune de linie între faze); $I_n=59$ A (curent de linie); $n_n=735$ rot/min. Rezistența statorului măsurată în curent continuu este $R_1=0{,}87\ \Omega$.

S-a efectuat o probă la funcționarea în scurtcircuit și s-a măsurat $P_k=1{,}08$ kW; $I_k=10{,}5$ A; $U_k=227$ V.

Scanned with OKEN Scanner

Cu formula (3.21) rezultă

$$Z_k(s=1)=\frac{227}{\sqrt{3}\cdot 10{,}5}=12{,}481\ \Omega.$$

Formula (3.20) dă

$$R_k(s=1)=\frac{1\,080}{3\cdot(10{,}5)^2}=3{,}265\ \Omega.$$

Cu formula (3.22) se obține:

$$X_k\ (s=1)=\sqrt{(12{,}5)^2-(3{,}26)^2}=12{,}047\ \Omega.$$

Cu formula (3.20 a) se găsește

$$R_2'(s=1)=3{,}265-1{,}05\cdot 0{,}87=2{,}351\ \Omega$$

unde

$$R_1=1{,}05\cdot 0{,}87=0{,}913\ \Omega.$$

Alunecarea nominală este

$$s_n=\frac{750-735}{750}=\frac{15}{750}=0{,}02.$$

Se adoptă aproximativ $c_1=1{,}03$ și cu ajutorul formulei (3.6 b) rezultă alunecarea critică

$$s_K=\frac{1{,}03\cdot 2{,}351}{12{,}047}=0{,}201.$$

Coeficientul

$$b_n=\frac{M_K}{M_n}$$

se poate determina cu ajutorul relației (3.15 c), unde se va adopta

$$P_{fr+v}=0{,}01\,P_n;$$

rezultă

$$b_n=\frac{(6\,000)^2\ (1-0{,}02)}{2\cdot 1{,}03\cdot 500\cdot 10^3\cdot 1{,}01\ (0{,}913+12{,}047)}=2{,}616.$$

În regim nominal $m_c=\frac{M}{M_n}=1$ și din formula (3.26) rezultă

$$s_{n1}=\frac{0{,}201}{2{,}616+\sqrt{(2{,}616)^2-1}}=0{,}0399.$$

Deci, pentru $s=1$ se obțin parametrii următori:

$$R_1=0{,}913\ \Omega;\ R_2'\ (s=1)=2{,}351\ \Omega;$$

$$X_{\sigma 1}+c_1X'_{\sigma 2}\ (s=1)=12{,}047\ \Omega;\ s_K=0{,}201$$

$$s_{n1}=0{,}0399.$$

La proba în sarcină s-a găsit

$$s=0{,}0033\ \text{și}\ P=97{,}3\ \text{kW}.$$

Scanned with OKEN Scanner

Alunecarea nominală, calculată cu valorile parametrilor la alunecări mici trebuie să corespundă acestei încercări. Din relaţia (3.11) se obţine

$$s_n \approx 0{,}0033 \frac{500}{97{,}3} = 0{,}0169.$$

Rezistenţa la valori mici ale alunecării este dată de relaţia (3.28 a):

$$R'_2 \ (s \approx s_n) = 2{,}351 \cdot \frac{1{,}69}{3{,}99} = 0{,}995 \ \Omega.$$

Într-o primă aproximaţie se va considera

$$X_{\sigma 1} + c_1 X'_{\sigma 2} \ (s \approx s_n) \approx X_{\sigma 1} + c_1 X'_{\sigma 2} \ (s = 1) = 12{,}047 \ \Omega.$$

Deci, pentru $s \approx s_n$ se obţin parametrii următori:

$$R_1 = 0{,}913 \ \Omega; \ R'_2 \ (s \approx s_n) = 0{,}995 \ \Omega; \ X_{\sigma 1} + c_1 X'_{\sigma 2} \ (s \approx s_n) = 12{,}047 \ \Omega.$$

Aplicînd expresiile (3.8 a) şi (3.9 c) pentru parametrii corespunzători valorilor mici ale alunecării se obţine:

$$b_n = 2{,}616, \ s_K \ (s \approx s_n) = \frac{0{,}995}{12{,}047} = 0{,}0825.$$

Utilizînd expresia (3.9) şi ţinînd seama că s-a găsit $b = b_n = 2{,}62$, se obţine pentru cuplu relaţia

$$\frac{M}{M_n} = \frac{2 \cdot 2{,}616}{\frac{s}{0{.}201} + \frac{0{,}201}{s}} \qquad (a)$$

pentru parametrii corespunzători alunecării $s = 1$, şi

$$\frac{M}{M_n} = \frac{2 \cdot 2{,}616}{\frac{s}{0{,}0825} + \frac{0{,}0825}{s}}, \qquad (b)$$

pentru parametrii corespunzători alunecărilor mici.

Pentru un calcul mai exact ar fi necesar să se recalculeze rezistenţele la temperatura normală de 75°C şi să se dispună de două încercări în sarcină care să permită calculul lui b_n şi al reactanţei pentru valori mici ale alunecării. Rezultatele nu diferă însă esenţial. În cazul calculelor mai exacte, pe baza datelor din catalogul maşinii, se obţine pentru curba cuplului calculată cu parametrii corespunzători alunecărilor mici.

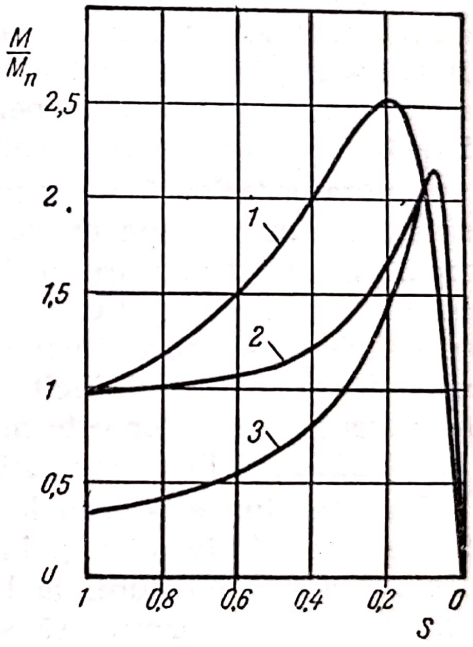


Fig. 3.5. Curba cuplului electromagnetic al unui motor de 500 kW, construită cu ajutorul încercării în scurtcircuit şi în sarcină:

1 — curba cuplului calculată cu parametrii determinaţi la alunecarea $s=1$ (expresia *a*); *2* — curba cuplului calculată cu parametrii determinaţi la o valoare mică a alunecării (expresia *c*); *3* — curba reală.

$$\frac{M}{M_n} = \frac{2 \cdot 2{,}2}{\frac{s}{0{,}085} + \frac{0{.}085}{s}}. \qquad (c)$$

În figura 3.5 sînt reprezentate curbele corespunzătoare ecuaţiilor (a), (c) şi curba reală.

Scanned with OKEN Scanner

3.5. CONDIȚIILE DE PORNIRE A MOTOARELOR ASINCRONE

Pentru a se asigura o bună exploatare a motoarelor asincrone și a mecanismelor acționate este necesar ca instalația de pornire să fie cît mai simplă și mai sigură. Cea mai simplă instalație de pornire este aceea în care se realizează conectarea directă la rețea a motorului asincron și ori de cîte ori este posibil se utilizează acest montaj [19, 24].

Dacă acest sistem de pornire produce o micșorare prea mare a tensiunii la pornire, atunci este necesar să se utilizeze alte metode de pornire: pornirea stea-triunghi, pornire cu autotransformator, pornirea cu reactor (bobină de reactanță), pornirea cu părți ale înfășurării etc.

O problemă de bază la alegerea unui motor este stabilirea puterii limită admisibile a motorului din condițiile de pornire. Cu cît puterea motorului este mai mare, cu atît curentul motorului la pornire crește și de aceea tensiunea rețelei în momentul pornirii scade mai mult și acest inconvenient este mare, deoarece rețeaua în afară de motorul respectiv alimentează și alte receptoare. De asemenea, este necesar să se verifice dacă în timpul pornirii temperatura înfășurărilor nu crește peste limitele admisibile (ceea ce se va examina la subcap. 3.8).

Limita inferioară a tensiunii la sistemul barelor de alimentare se determină din condiția ca valoarea cuplului dat de motor să fie în tot timpul pornirii mai mare decît valoarea cuplului rezistent. De asemenea, este necesar să se verifice că, pentru tensiunea admisă, cuplul motorului este suficient de mare, încît să asigure pornirea motorului într-un timp destul de scurt, astfel încît încălzirea înfășurărilor în timpul pornirii, cînd curentul în motor este mai mare în general decît în regim nominal, să nu depășească limitele admisibile.

Dacă tensiunea la bornele motorului este suficient de mare, durata de pornire este relativ mică și încălzirea înfășurărilor este moderată. O valoare ridicată a tensiunii la bornele motorului permite, datorită micșorării duratei de pornire, să se reducă acțiunea defavorabilă a scăderii tensiunii în timpul pornirii asupra celorlalte receptoare.

Dacă există o singură rețea de alimentare pentru instalația de iluminat și pentru instalația de putere, nu se admite o scădere a tensiunii în timpul pornirii sub (0,9—0,85) U_n. Dacă instalația de iluminat și instalația de putere au alimentări separate, atunci se admite ca tensiunea să scadă în timpul pornirii la 0,8 U_n sau chiar uneori la o valoare mai mică. Dacă motorul are rotorul bobinat, atunci printr-o dimensionare corespunzătoare a reostatului de pornire se pot asigura aceste condiții.

Dacă motorul are rotorul de tip colivie, este necesar să se verifice dacă pentru rețeaua la care urmează să fie conectat motorul, este posibilă îndeplinirea condițiilor impuse. Uneori este necesar să se utilizeze o metodă de pornire care să permită reducerea curentului, care este însoțită însă și de o oarecare reducere a cuplului.

Scanned with OKEN Scanner

3.5.1. Pornirea unui motor cu rotorul tip colivie alimentat de la o rețea de putere infinită. Determinarea valorii limită a puterii aparente la sistemul de bare, la pornire

Dacă motorul este alimentat de la o sursă de putere infinită, atunci se poate utiliza pentru calculul tensiunii în momentul pornirii schema din fig. 3.6.

Curentul este

$$\underline{I}_p = \frac{\underline{U}_1}{jX + \frac{\underline{Z}_{motor}\,\underline{Z}_{sarcină}}{\underline{Z}_{motor}+\underline{Z}_{sarcină}}},$$

sau

$$\underline{I}_p = \frac{\underline{U}_1}{jX+\underline{Z}_p},$$

unde s-a notat:

X — reactanța totală a bobinei de reactanță și a rețelei de la transformator pînă la sistemul de bare;

$$\underline{Z}_p = R_p + jX_p = \frac{\underline{Z}_{motor}\,\underline{Z}_{sarcină}}{\underline{Z}_{motor}+\underline{Z}_{sarcină}};$$

Deci

$$\underline{U} = \underline{Z}_p\underline{I}_p = \frac{\underline{U}_1\,\underline{Z}_p}{jX+\underline{Z}_p}.$$

Valoarea eficace a tensiunii la sistemul de bare în momentul pornirii motorului este

$$U = \frac{U_1 Z_p}{\sqrt{R_p^2+(X+X_p)^2}}; \qquad (3.29)$$

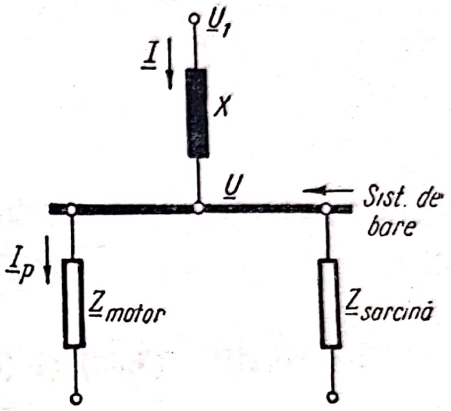


Fig. 3.6. Schema instalației conținînd un motor obișnuit alimentat de la o sursă de putere infinită:

X — reactanța dintre sursa de alimentare și sistemul de bare care alimentează motorul;

$\underline{Z}_{motor} = R_{motor} + jX_{motor}$ — impedanța motorului la pornire;

$\underline{Z}_{sarcina} = R_{sarcina} + jX_{sarcina}$ — impedanța sarcinii conectate în paralel cu motorul.

Pentru a putea efectua calculele mai convenabil, se va exprima impedanța Z_p în unități relative și anume, fracțiuni din impedanța nominală $Z_n = \frac{U_n}{I_n}$ a sursei de alimentare. Se va nota cu U_n tensiunea nominală, iar cu I_n curentul nominal al sursei. Se obține în unități relative impedanța

$$\tilde{Z}_p = \frac{Z_p}{\frac{U_n}{I_n}} = \frac{mZ_pU_nI_n}{mU_n^2}. \qquad (3.29a)$$

Dar $mU_nI_n = S_{rn}$ reprezintă puterea aparentă a sursei, iar $\frac{mU_n^2}{Z_p} = S_{r\,por}$ reprezintă puterea aparentă maximă pe care o pot primi la pornire motoarele și celelalte receptoare de la sursă, cînd la sistemul de bare s-ar aplica toată tensiunea rețelei. Mărimea $S_{r\,por}$ se numește putere condiționată de pornire. Deci rezultă că raportul dintre puterea aparentă condiționă-

nată de pornire dată de sursă (sau rețea) $S_{r\,por}$ și puterea nominală a sursei (rețelei) S_{rn} este

$$\frac{S_{r\,por}}{S_{r\,n}} = \frac{1}{\widetilde{Z}_p}, \tag{3.30}$$

unde $\widetilde{Z}_p$ este impedanța ansamblului motoare și alte sarcini conectate la sistemul de bare, exprimată în unități relative.

Raportul dintre tensiunea la bornele motorului U și tensiunea rețelei U_1 este dat de relația (3.29) și dacă se neglijează rezistențele față de reactanțe se obține

$$\frac{U}{U_1} = \frac{\widetilde{X}_p}{\widetilde{X}_p + \widetilde{X}}, \tag{3.31}$$

unde reactanțele sînt exprimate în unități relative:

$$\widetilde{X} = \frac{X I_n}{U_n}; \qquad \widetilde{X}_p = \frac{X_p I_n}{U_n}. \tag{3.32a, b}$$

Din relațiile (3.30) și (3.32), dacă se neglijează R_p, rezultă

$$\frac{S_{r\,por}}{S_{r\,n}} = \frac{\frac{U_1}{U} - 1}{\widetilde{X}}. \tag{3.33}$$

Studii mai amănunțite au arătat că în marea majoritate a cazurilor care interesează în practică, influența rezistenței motorului și rețelei se poate neglija.

Este util de menționat că la funcționare normală, tensiunea rețelei U_1, trebuie să fie mai mare decît tensiunea la sistemul de bare, ca să poată compensa căderea de tensiune pe reactanța X cuprinsă între rețea și sistemul de bare de la care este alimentat motorul. De aceea, este necesar ca valoarea nominală a tensiunii secundare a transformatorului să fie mai mare decît valoarea nominală a tensiunii receptoarelor de energie electrică. De această circumstanță trebuie să se țină seama la calculul reactanței X_p. În acest caz impedanța $\widetilde{Z}_p$ se exprimă în fracțiuni din impedanța nominală ca și mai înainte, dar sub o formă convenabilă pentru calcule, luînd ca bază valorile nominale ale tensiunii și curentului secundar al transformatorului U_{2n} și I_{2n}. Se obține ca mai înainte:

$$\widetilde{Z}_p = \frac{mZ_p U_{2n} I_{2n}}{mU_{2n}^2} = \frac{mU_{2n} I_{2n}}{\frac{mU_{2n}^2}{Z_p}} = \frac{S_{2n}}{\frac{mU_{2n}^2}{Z_p}}.$$

Dacă se introduce valoarea nominală a tensiunii receptorului U_{rn} se obține

$$\widetilde{Z}_p = \frac{S_{2n}}{\frac{mU_{2n}^2}{Z_p}} \cdot \frac{U_{rn}^2}{U_{rn}^2}.$$

Scanned with OKEN Scanner

Dar curentul absorbit la pornire de la sistemul de bare la tensiunea nominală a receptoarelor $U=U_{rn}$ este

$$I_p=k_{pr}I_n=\frac{U_{rn}}{Z_p},$$

unde k_{pr} este raportul dintre curentul absorbit de la sistemul de bare în momentul pornirii motoarelor și curentul absorbit nominal. Astfel,

$$Z_p=\frac{S_{2n}}{\frac{mU_{rn}}{Z_p}U_{rn}}\cdot\frac{U_{rn}^2}{U_{2n}^2}=\frac{S_{2n}}{mk_{pr}I_nU_{rn}}\cdot\frac{U_{rn}^2}{U_{2n}^2},$$

Deci reactanța X_p, în cazul cînd la sistemul de bare este conectat un singur motor, are expresia

$$\widetilde{X}_p=\frac{S_{2n}}{3U_{rn}I_nk_{pr}}\cdot\frac{U_{rn}^2}{U_{2n}^2}, \tag{3.34}$$

unde pentru tensiuni s-au introdus valorile de fază, iar rezistențele au fost neglijate.

3.5.2. Determinarea puterii limită a motorului

După ce motorul a fost pornit este necesar ca puterea totală absorbită să nu depășească puterea nominală a sursei de alimentare. Deci se poate exprima suma puterilor active și suma puterilor reactive și rezultă:

$$S_{rn}=\sqrt{P_{rn}^2+Q_{rn}^2}, \tag{3.35a}$$

$$P_{rn}=P_{mot\,n}+P_{sar\,n}=$$

$$=S_{mot\,n}\cos\varphi_{mot\,n}+S_{sar\,n}\cos\varphi_{sar\,n}; \tag{3.35b}$$

$$Q_{rn}=Q_{mot\,n}+Q_{sar\,n}=$$

$$=S_{mot\,n}\sin\varphi_{mot\,n}+S_{sar\,n}\sin\varphi_{sar\,n}. \tag{3.35c}$$

La pornire puterea aparentă absorbită de motor de la rețea este

$$S_{mot\,p}=k_{p\,mot}S_{mot\,n}\ (\text{unde } k_{p\,mot}=k_{pr}\text{ pentru } U=U_n)$$

și deci puterea aparentă totală cerută la pornire este

$$S_{r\,por}=\sqrt{P_{r\,por}^2+Q_{r\,por}^2}, \tag{3.36a}$$

unde

$$P_{r\,por}=k_{p\,mot}S_{mot\,n}\cos\varphi_{mot\,k}+S_{sar\,n}\cos\varphi_{sar} \tag{3.36b}$$

și

$$Q_{r\,por}=k_{p\,mot}S_{mot\,n}\sin\varphi_{mot\,k}+S_{sar\,n}\sin\varphi_{sar}. \tag{3.36c}$$

Scanned with OKEN Scanner

Pentru simplificare se efectuează calculul punînd în ecuațiile (3.35):

$$\cos \varphi_{mot\ n} \approx \cos \varphi_{sar\ n}$$

și în ecuațiile (3.36)

$$\cos \varphi_{mot\ k} \approx \cos \varphi_{sar} \approx 0,$$

adică la calculul curenților de pornire se neglijează rezistențele, ceea ce este în general admis. De asemenea, se va admite $S_{sar\ n} = S_{sar}$, adică puterea receptoarelor conectate în paralel cu motoarele nu variază.

Cu aceste simplificări se obține din ecuațiile (3.35):

$$S_{r\ n} = S_{mot\ n} + S_{sar\ n},$$

iar din ecuațiile (3.36):

$$S_{r\ por} = Q_{r\ por} = k_{p\ mot}\ S_{mot\ n} + S_{sar\ n}.$$

Totdeauna $k_{p\ mot} > 1$. Deci,

$$S_{r\ por} = k_{p\ mot}\ S_{mot\ n} + S_{r\ n} - S_{mot\ n}.$$

Rezultă:

$$\frac{S_{r\ por}}{S_{r\ n}} = \frac{S_{mot\ n}}{S_{rn}} (k_{p\ mot} - 1) + 1 \qquad (3.37)$$

și

$$\frac{S_{mot\ n}}{S_{r\ n}} = \frac{\dfrac{S_{r\ por}}{S_{rn}} - 1}{k_{p\ mot} - 1}. \qquad (3.38)$$

Din ecuațiile (3.33) și (3.38) se obține

$$\frac{S_{mot\ n}}{S_{rn}} = \frac{\left(\dfrac{U_1}{U} - 1\right)\dfrac{1}{\widetilde{X}} - 1}{k_{p\ mot} - 1}. \qquad (3.39)$$

Dar puterea aparentă nominală la bornele motorului este

$$S_{mot\ n} = \frac{P_{mot\ n}}{\eta_{mot\ n} \cos \varphi_{mot\ n}}$$

și atunci se obține din relația (3.39)

$$P_{mot\ n} = \frac{\eta_{mot\ n} \cos \varphi_{mot\ n}\ S_{rn}}{k_{p\ mot} - 1} \left[\left(\frac{U_1}{U} - 1\right)\frac{1}{\widetilde{X}} - 1\right]. \qquad (3.40)$$

3.5.3. Tensiunea la barele de alimentare a motorului

Aici se va indica o altă condiție importantă care trebuie îndeplinită, pentru a permite pornirea și anume ca tensiunea la bare, în momentul pornirii, să nu fie prea scăzută.

Scanned with OKEN Scanner

Tensiunea $\underline{U}_1$ a rețelei se poate exprima în funcție de tensiunea $\underline{U}$ la barele sistemului de alimentare (fig. 3.6),

$$\underline{U}_1 = \underline{U} + jX\underline{I}.$$

Din diagrama de fazori reprezentată în fig. 3.7 se obține

$$U_1 = \sqrt{(U + XI \sin\varphi)^2 + (XI \cos\varphi)^2}$$

sau

$$\frac{U_1}{U} = \sqrt{\left(\frac{XI}{U}\cos\varphi\right)^2 + \left(1 + \frac{XI}{U}\sin\varphi\right)^2}.$$

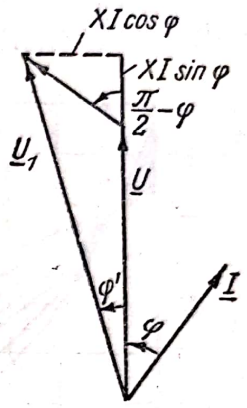


Fig. 3.7. Diagrama de fazori a tensiunilor din fig. 3.6.

Dacă se exprimă reactanța X în unități relative, se poate scrie

$$\widetilde{X} = \frac{XI_n}{U_n},$$

unde U_n și I_n sînt valorile nominale ale tensiunii și curentului rețelei.

Deci,

$$\frac{U_1}{U} = \sqrt{\left(\widetilde{X}\frac{I}{I_n}\cdot\frac{U_n}{U}\cos\varphi\right)^2 + \left(1 + \widetilde{X}\frac{I}{I_n}\cdot\frac{U}{U_n}\sin\varphi\right)^2}. \quad (3.41)$$

În practică este de dorit ca la sistemul de bare $U = U_n$.

În regim nominal, $U = U_n$; $I = I_n$ și relația (3.41) devine

$$\frac{U_1}{U_n} = \sqrt{(\widetilde{X}\cos\varphi)^2 + (1 + \widetilde{X}\sin\varphi)^2}. \quad (3.42)$$

Pentru o valoare dată a lui $\cos\varphi$ și $\widetilde{X}$ rezultă o anumită valoare a tensiunii rețelei U_1 care asigură la sistemul de bare tensiunea nominală pentru curentul nominal. În general, se face această determinare pentru $\cos\varphi = 0{,}8$.

Relația (3.29) se poate scrie

$$\frac{U}{U_1} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{R_p}{Z_p}\right)^2 + \left(\frac{X}{Z_p} + \frac{X_p}{Z_p}\right)^2}}$$

sau, avînd în vedere că

$$\frac{R_p}{Z_p} = \cos\varphi_k; \quad \frac{X_p}{Z_p} = \sin\varphi_k,$$

$$\frac{X}{Z_p} = \frac{\widetilde{X}}{\widetilde{Z}_p} = \widetilde{X}\frac{S_{r\,por}}{S_{rn}};$$

și

$$\widetilde{Z}_p = \frac{S_{rn}}{S_{r\,por}};$$

rezultă

$$\frac{U}{U_1}=\frac{1}{\sqrt{(\cos\varphi_k)^2+\left(\sin\varphi_k+\widetilde{X}\,\frac{S_{rpor}}{S_{rn}}\right)^2}}, \tag{3.43}$$

Pentru o valoare dată a lui $\widetilde{X}$ şi cos φ, de exemplu cos φ = 0,8, rezultă din relaţia (3.42) o anumită valoare U_1. Introducînd valoarea găsită pentru U_1 şi de exemplu cos φ_k = 0,35 în relaţia (3.43), rezultă U deci $\frac{U}{U_n}$.

În acest fel au fost obţinute curbele din fig. 3.8.

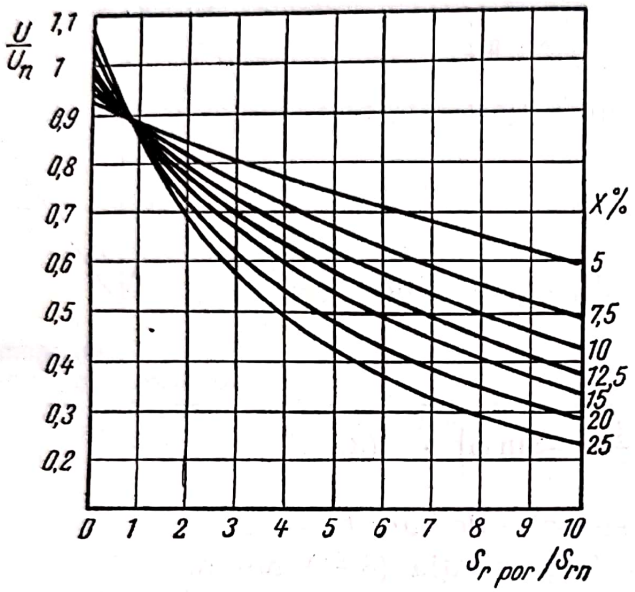


Fig. 3.8. Tensiunea la sistemul de bare, în funcţie de raportul puterii maxime de pornire $S_{r\,por}/S_{r\,n}$ la diferite valori ale reactanţei X [11].

3.5.4. Condiţia cuplului de pornire

Pentru ca pornirea să fie posibilă este necesar ca cuplul dezvoltat de motor M_{mot} să fie mai mare decît cuplul rezistent produs de mecanismul acţionat M_{rp} în momentul pornirii.

$$M_{mot} > M_{rp}.$$

Dar

$$M_{mot}=\left(\frac{U_p}{U_n}\right)^2 M_p,$$

unde U_p este tensiunea la pornire, iar M_p cuplul de pornire la tensiunea nominală şi deci

$$\left(\frac{U_p}{U_n}\right)^2 M_p > M_{rp}$$

sau

$$\left(\frac{U_p}{U_n}\right)^2 \frac{M_p}{M_n} > \frac{M_{rp}}{M_n}$$

sau

$$\left(\frac{U_p}{U_n}\right)^2 \frac{M_p}{M_n} > \frac{M_{rp}}{M_{rn}} \cdot \frac{M_{rn}}{M_n},$$

unde M_{rn} este cuplul rezistent nominal al mecanismului. Pentru siguranţă se lasă o rezervă de 10% la cuplul motor. Deci condiţia ca motorul să poată porni este

$$\left(\frac{U_p}{U_n}\right)^2 \frac{M_p}{M_n} > 1{,}1\,\frac{M_{rp}}{M_{rn}} \cdot \frac{M_{rn}}{M_n}, \tag{3.44}$$

Scanned with OKEN Scanner

unde s-a notat:

$\frac{U_p}{U_n}$ — raportul dintre tensiunea la bornele motorului în momentul pornirii și tensiunea nominală;

$\frac{M_p}{M_n}$ — raportul dintre cuplul dat de motor în momentul pornirii, dacă tensiunea ar avea valoarea nominală, și cuplul nominal;

$\frac{M_{rp}}{M_{rn}}$ — raportul dintre cuplul rezistent al mecanismului acționat în momentul pornirii și cuplul rezistent nominal;

$\frac{M_{rn}}{M_n}$ — raportul dintre cuplul rezistent nominal al mecanismului și cuplul nominal al motorului, sau ceea ce este același lucru, raportul celor două puteri nominale corespunzătoare.

Pe baza celor expuse în paragraful precedent se poate calcula tensiunea la pornire U_p la bornele motorului și astfel sînt cunoscute toate mărimile care intră în relația (3.44) și se poate verifica dacă inegalitatea este îndeplinită.

3.5.5. **Durata pornirii**

Este de dorit ca durata pornirii, denumită și timpul de pornire să fie cît mai mică, deoarece atunci încălzirea înfășurărilor este mai mică. Durata pornirii se stabilește pentru fiecare motor în parte, fie prin calcul utilizînd ecuațiile de mișcare, fie experimental.

Pentru orientare se va indica durata de pornire pentru un motor asincron de tip normal, a cărui alunecare critică este $s_K=0{,}15$ și care acționează un mecanism cu cuplul rezistent de tip ventilator, a cărui expresie este

$$m_r=m_{por}+(1-m_{por})v^2,$$

unde

$$m_r=\frac{M_r}{M_{rn}},$$

M_r fiind cuplul rezistent al mecanismului, iar M_{rn} valoarea nominală a cuplului rezistent al mecanismului. Se va considera

$$m_{por}=0{,}15.$$

Durata pornirii depinde de constanta mecanică de timp a motorului și mecanismului acționat

$$T_a=\frac{J\Omega_n}{M_n},$$

Scanned with OKEN Scanner

unde J este momentul total de inerție, iar Ω_n viteza unghiulară nominală. Această problemă se tratează în lucrările de acționări electrice.

În fig. 3.9 sînt date curbele de pornire și anume, durata pornirii în funcție de tensiunea motorului, pentru diferitele valori ale cuplului maxim.

Din examinarea acestor curbe se vede că durata pornirii scade foarte repede, mai repede decît proporțional, odată cu creșterea raportului dintre cuplul maxim și cuplul nominal. De exemplu, dacă pentru $\frac{U}{U_n}=0{,}7$, raportul $\frac{M_K}{M_n}$ crește de la 1,6 la 2, adică de 1,25 ori, atunci durata pornirii scade de 1,63 ori.

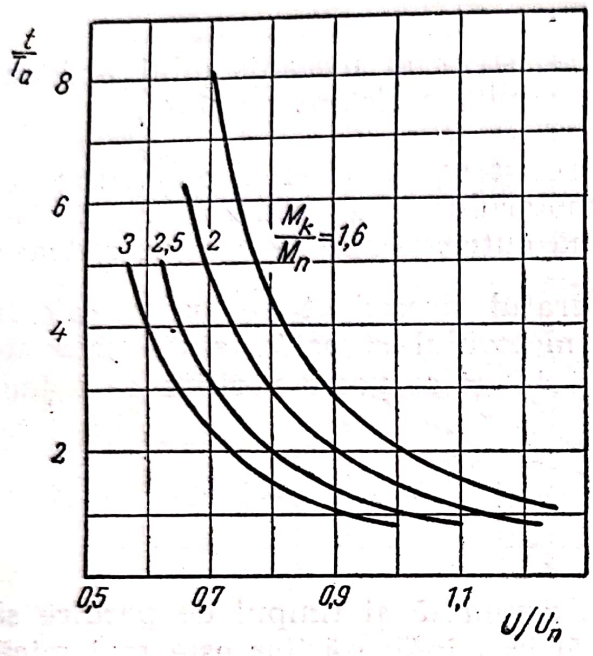


Fig. 3.9. Curbele dependenței duratei pornirii t/T_a în funcție de U/U_n, pentru diferite valori ale cuplului maxim M_K/M_n [11].

3.5.6. Încălzirea înfășurărilor la pornire

Curentul la pornire fiind mai mare decît curentul nominal, încălzirea înfășurărilor poate fi de asemenea mai mare, dacă durata pornirii este relativ mare.

Dacă la pornirea motorului, tensiunea scade, atunci încălzirea motorului crește deoarece cuplul dat de motor scade și ca urmare crește durata pornirii.

Motoarele care au raportul $\frac{M_K}{M_n}$ mare se încălzesc mai repede, deoarece valoarea mare a acestui raport înseamnă o valoare mică a reactanței de scăpări și deci un curent mare la pornire. Alte detalii se dau la subcap. 3.8.

3.5.7. Curentul de pornire

La pornire curentul este în general mult mai mare decît curentul nominal și scade odată cu accelerarea mașinii. Pentru claritate s-au dat în fig. 3.10 curbele limită ale oscilogramei curentului de pornire al unui motor asincron.

La pornirea unui motor asincron trebuie să se aibă în vedere că are loc o creștere a curentului, care produce o scădere a tensiunii la sistemul de bare de alimentare la care sînt conectate și alte receptoare

Scanned with OKEN Scanner

și această micșorare a tensiunii poate provoca deficiențe în funcționarea receptoarelor, de aceea este necesar să se verifice cu atenție cazurile în care curentul de pornire este prea mare.

Exemplul 1. Se cere să se determine tensiunea la sistemul de bare, la conectarea unui motor care are următoarele date: putere utilă $P_n=2\,000$ kW; putere aparentă $S_n=2\,350$ kVA; tensiune de linie $U_n=3$ kV, $I_n=450$ A; $\frac{I_p}{I_n}=5{,}5$; $\cos\varphi_{mot\,k}=0{,}25$. Motorul este alimentat printr-o bobină de reactanță cu datele: tensiunea de linie $U_n=3$ kV; $I_n=600$ A și $X_b=6\%$. Reactanța rețelei pînă la bobina de reactanță, raportată la puterea aparentă de 100 MVA și tensiunea de linie de 3 kV este $X_r=70\%$. Tensiunea la sistemul de bare la funcționarea în gol este de 3,1 kV. La sistenul de bare nu se conectează nici un alt receptor.

St va determina impedanța rețelei și a reactorului, raportate la puterea aparentă a bobinei de reactanță: $S_b=\sqrt{3}U_nI_n=\sqrt{3}\cdot3\cdot600=3{,}117\cdot10^3$ kVA$=$ $=3{,}117$ MVA. Reactanța rețelei, recalculată la tensiunea $U_{bn}=3$ kV și curentul nominal $I_{bn}=600$ A al bobinei de reactanță, este

$$X_r\%=X_r\frac{I_{bn}}{U_{bn}}100=X_r\frac{I_{rn}}{U_{rn}}\cdot\frac{I_{bn}}{U_{bn}}\cdot\frac{U_{rn}}{I_{rn}}\cdot100;$$

dar

$$X_r\frac{I_{rn}}{U_{rn}}\cdot100=70\%,$$

iar

$$\frac{I_{bn}}{U_{bn}}\cdot\frac{U_{rn}}{I_{rn}}=\frac{600}{3}:\frac{3{,}1}{\frac{100\cdot10^6}{\sqrt{3}\cdot3{,}1\cdot10^3}}=0{,}0332$$

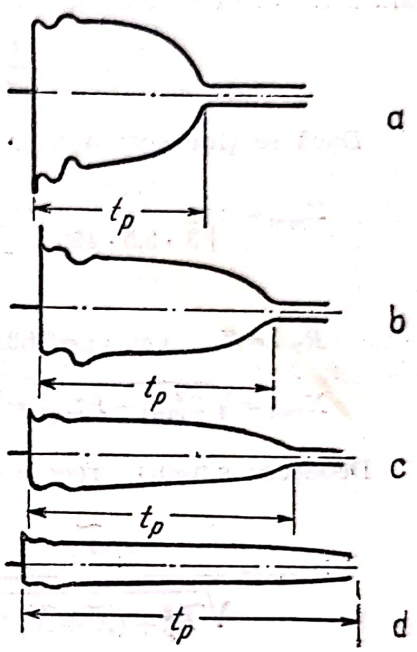


Fig. 3.10. Curentul de pornire al unui motor asincron de 220 kW, pentru diferite valori ale tensiunii de alimentare:
a — 6 500 V; *b* — 6 000 V; *c* — 5 000 V; *d* — 4 000 V.

$$I_{rn}=\frac{S_{rn}}{\sqrt{3}\,U_{rn}}=\frac{100\cdot10^6}{\sqrt{3}\cdot3{,}1\cdot10^3},$$

deci

$$X_r\%=70\cdot0{,}0332=2{,}330\%.$$

Rezultă că reactanța totală a bobinei de reactanță și rețelei, raportată la valorile nominale ale tensiunii și curentului bobinei de reactanță, este

$$X=X_b+X_r=8{,}33\%.$$

Reactanța motorului

$$X_{mot}=\frac{U_n}{\sqrt{3}\,I_p}=\frac{3\,000}{\sqrt{3}\cdot5{,}5\cdot450}\,\Omega.$$

Reactanța motorului raportată, ca și celelalte reactanțe, la tensiunea și curentului bobinei de reactanță este

$$\widetilde{X}_{mot}=\frac{3\,000}{\sqrt{3}\cdot5{,}5\cdot450}\cdot\frac{600}{\frac{3\,000}{\sqrt{3}}}=0{,}242\text{ sau }24{,}2\%.$$

Tensiunea la bornele motorului în momentul pornirii se poate calcula cu formula (3.5.4).

$$U = U_1 \frac{\widetilde{X}_p}{\widetilde{X}_p + \widetilde{X}} = 3\,100 \frac{24{,}2}{24{,}2 + 8{,}330} = 2\,306 \text{ V}.$$

Raportul dintre tensiunea la bornele motorului la pornire și valoarea nominală a tensiunii motorului este

$$\frac{U_{mot}}{U_n} = \frac{U}{U_n} = \frac{2\,306}{3\,000} = 0{,}768.$$

Dacă se ține seama de rezistența activă și se refac calculele, se obține

$$Z_{mot} = \frac{3\,000}{\sqrt{3} \cdot 5{,}5 \cdot 450} \cdot \frac{600}{\frac{3\,000}{\sqrt{3}}} = 0{,}242 \text{ sau } 24{,}2\%;$$

$$R_{mot} = Z_{mot} \cos \varphi_k = 24{,}3 \cdot 0{,}25 = 6{,}05\%;$$

$$X_{mot} = \sqrt{Z_{mot}^2 - R_{mot}^2} = \sqrt{(24{,}2)^2 - (6{,}05)^2} = 23{,}43\%.$$

Deoarece singurul receptor este motorul $Z_p = Z_{mot}$,

$$U_{mot} = \frac{U_1 \widetilde{Z}_p}{\sqrt{\widetilde{R}_p^2 + (\widetilde{X} + \widetilde{X}_p)^2}} = \frac{3\,100 \cdot 24{,}2}{\sqrt{(6{,}05)^2 + (8{,}330 + 23{,}43)^2}} = 2\,320 \text{ V}.$$

$$\frac{U_{mot}}{U_n} = \frac{2\,320}{3\,000} = 0{,}773.$$

Rezultă că influența rezistenței în calcule se poate neglija.

Exemplul 2. Se cere să se determine tensiunea și curentul de pornire ale unui motor asincron cu datele: $P_n = 875$ kW; $U_n = 6$ kV; $I_n = 100$ A; $\cos \varphi = 0{,}88$; $\frac{I_p}{I_n} = 5{,}5$; $\cos \varphi_k = 0{,}25$; $\frac{M_p}{M_n} = 1{,}1$. Motorul este alimentat de la o rețea de putere practic infinită, printr-un transformator cu datele: $S_n = 1\,000$ kVA; $U_1/U_2 = 35/6{,}3 \pm 5\%$; $u_k = 6{,}5\%$. Motorul este legat la borna medie a transformatorului, deci valoarea nominală a tensiunii secundare la funcționarea în gol a transformatorului este 6,3 kV, iar tensiunea primară este de 35 kV.

În acest caz cu formula (3.34), ținînd seama că aici se cunoaște tensiunea de linie, se obține

$$\widetilde{X}_p = \frac{S_{2n}}{\sqrt{3}\, U_{rn} I_n k_{pr}} \left(\frac{U_{rn}}{U_{2n}}\right)^2 = \frac{1\,000}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 100 \cdot 5{,}5} \cdot \left(\frac{6}{6{,}3}\right)^2 = 0{,}159.$$

Deoarece $u_k = 0{,}065$, urmează că reactanța transformatorului este $\widetilde{X} = 0{,}065$ sau 6,5% și tensiunea la bornele motorului în momentul pornirii se obține cu formula (3.32).

$$U = \frac{\widetilde{U}_1 \widetilde{X}_p}{\widetilde{X} + \widetilde{X}_p} = \frac{6\,300 \cdot 0{,}159}{0{,}065 + 0{,}159} = 4471 \text{ V},$$

Scanned with OKEN Scanner

deci la bornele motorului

$$\frac{U}{U_n}=\frac{4\,471}{6\,000}=0{,}745.$$

Puterea aparentă condiționată la pornire, adică puterea aparentă absorbită de receptoare în momentul pornirii dacă nu există impedanță între rețea și receptor este

$$\frac{S_{r\ por}}{S_{r\ n}}=\frac{1}{\widetilde{Z}_p}\approx\frac{1}{\widetilde{X}_p};$$

deci

$$\frac{S_{r\ por}}{S_{r\ n}}=\frac{1}{0{,}159}=6{,}289.$$

sau

$$S_{r\ por}=6{,}289\ S_{r\ n}.$$

Deoarece între receptoare și rețea există o impedanță, are loc o reducere a tensiunii la bornele receptoarelor și deci și a puterii aparente și deci se obține că puterea aparentă a motoarelor la pornire este

$$S_{mot\ p}=6{,}3\ \frac{4\,470}{6\,300}\ S_{r\ n}=4{,}463\ S_{r\ n}.$$

Deci puterea aparentă și curentul absorbit la pornire de motor reprezintă de 4,463 ori valoarea nominală.

3.6. METODE DE PORNIRE A MOTOARELOR ASINCRONE CU ROTORUL ÎN SCURTCIRCUIT

În prezent există diferite metode pentru pornirea motoarelor cu rotorul în scurtcircuit, dintre care cele mai utilizate sînt: pornirea prin reactanțe sau rezistențe conectate în circuitul statoric; pornirea prin autotransformator; pornirea prin conexiune stea-triunghi, pornirea prin înfășurare parțială.

În primele trei metode la pornire se aplică statorului o tensiune redusă; ca urmare, se produce atît o micșorare a curentului cît și o micșorare a cuplului. Ultima metodă constă în utilizarea la pornire numai a unei părți a înfășurării, iar la pornire are loc de asemenea o reducere atît a curentului cît și a cuplului.

Comparînd primele două metode se poate arăta că prima este mai ieftină, în schimb a doua asigură o valoare mai mare a cuplului de pornire pentru aceeași valoare a curentului de pornire. Metoda a treia de pornire stea-triunghi este și mai convenabilă decît primele două din punct de vedere economic, deoarece necesită doar un comutator; totuși metoda prezintă următoarele inconveniente: cuplul de pornire este $\frac{1}{3}\ M_n$, deci o valoare scăzută; salt relativ mare al curentului la trecerea de la conexiunea stea la conexiunea triunghi, care poate fi

Scanned with OKEN Scanner

evitat numai cu ajutorul unor comutatoare speciale care scumpesc instalația.

Ultima metodă, adică pornirea cu înfășurare parțială este mai convenabilă decît metoda de pornire stea-triunghi, deoarece schema de pornire necesită un număr mai mic de contacte, evită salturile de curent și asigură un cuplu de pornire mai mare, dar prezintă în schimb inconvenientul de a necesita oarecare complicație în construcția motorului, deoarece necesită 6 capete ale înfășurării la cutia de borne.

După cum se vede, fiecare metodă de pornire are avantaje și dezavantaje care delimitează utilizarea ei în diferitele cazuri.

3.6.1. Pornirea prin rezistențe sau reactanțe conectate în circuitul statoric

Această metodă este în general bine cunoscută, în special cînd pornirea se execută prin bobine de reactanță. Aici se va expune pornirea prin rezistențe.

Dintre diferitele posibilități se vor indica două, considerate mai interesante.

Pornirea cu conexiune triunghi dezechilibrat. Schema de pornire este reprezentată în fig. 3.11. Datorită faptului că sistemul de curenți statorici nu este simetric, în intrefierul mașinii apar două cîmpuri învîrtitoare în sens contrar și ca urmare are loc o reducere a curenților și a cuplului de pornire.

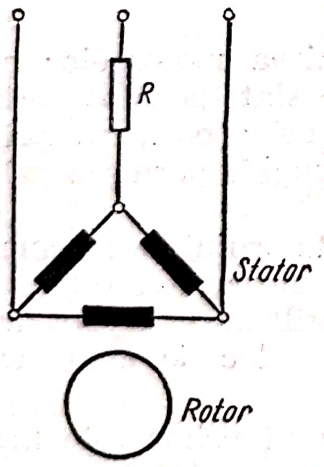


Fig. 3.11. Schema de pornire în triunghi dezechilibrat.

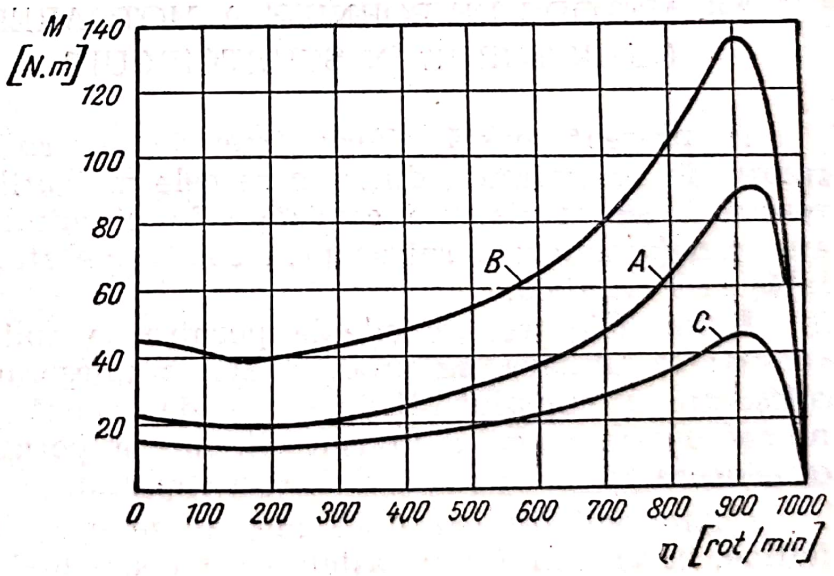


Fig. 3.12. Caracteristica cuplului electromagnetic [20]: *A* — schema în triunghi dezechilibrat; $R=2{,}08\Omega$; *B* — schema în triunghi echilibrat; *C* — schema în stea.

Pentru comparare, în fig. 3.12 se dă curba cuplului motorului asincron cu această schemă și curbele cuplului pentru conexiunea stea și conexiunea triunghi.

Scanned with OKEN Scanner

Curenții de fază și de linie ai schemei triunghi dezechilibrat formează sisteme nesimetrice. Curentul de linie este pe două din linii mai mic decît în cazul triunghiului echilibrat, iar pe o linie este puțin mai mare decît în cazul triunghiului echilibrat, dar valoarea medie a curenților este mai mică decît în cazul schemei triunghi echilibrat. Detalii de calcul pot fi găsite în lucrarea [2].

Pornirea cu triunghi deschis. Presupunînd că pe una din laturile unei conexiuni în triunghi se introduce o rezistență infinită, ceea ce revine la a considera o fază întreruptă, se obține schema din fig. 3.13. Ca și în cazul precedent, curenții din înfășurarea statorului nu formează un sistem simetric, de aceea în întrefierul mașinii apar două cîmpuri învîrtitoare în sensuri contrarii, și ca urmare, are loc o reducere a curenților și a cuplului de pornire.

Pentru comparare în fig. 3.14 se dă curba cuplului motorului asincron cu această schemă și curbele cuplului pentru conexiunea stea și conexiunea triunghi.

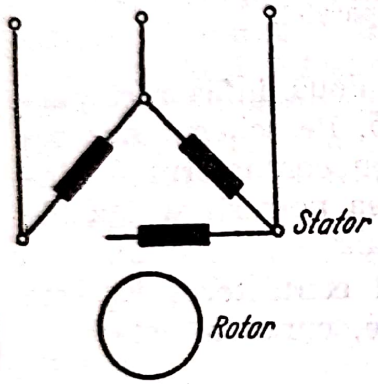


Fig. 3.13. Schema de pornire în triunghi dezechilibrat (fază întreruptă) [20].

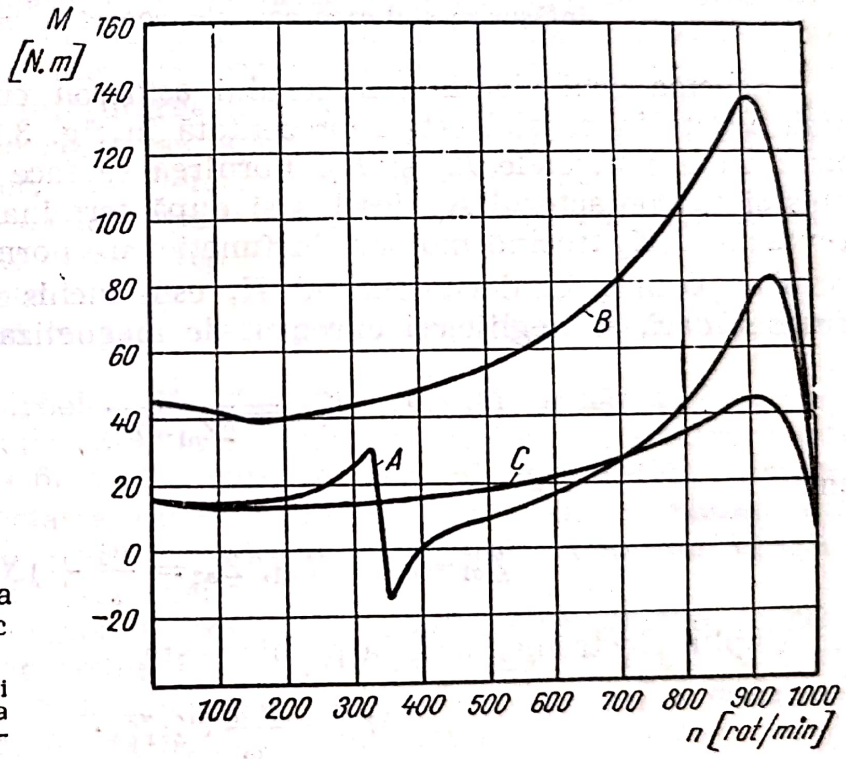


Fig. 3.14. Caracteristica cuplului electromagnetic [20]:
A — schema în triunghi dezechilibrat; *B* — schema în triunghi echilibrat; *C* — schema în stea.

Curenții în acest caz formează de asemenea un sistem nesimetric. Curentul de linie, pe două din linii nu diferă mult de cazul triunghiului echilibrat, iar pe o linie este puțin mai mare decît în cazul triunghiului echilibrat. Detalii de calcul pot fi găsite în lucrarea [2].

3.6.2. Pornirea prin înfășurare parțială

Pentru a putea aplica această metodă, este necesar ca motorul să aibă o înfășurare dublă, legată în stea sau triunghi, iar cele șase capete ale acestei înfășurări să fie legate la șase borne distincte.

Scanned with OKEN Scanner

Deci utilizarea metodei necesită două înfășurări parțiale, care funcționează în paralel. Metoda se aplică și în cazurile cînd motorul are mai mult de două ramuri în paralel [19, 25].

La această metodă de pornire pot fi adaptate motoarele asincrone cu rotorul în scurtcircuit, care au înfășurarea statorică cu cel puțin două căi de curent în paralel.

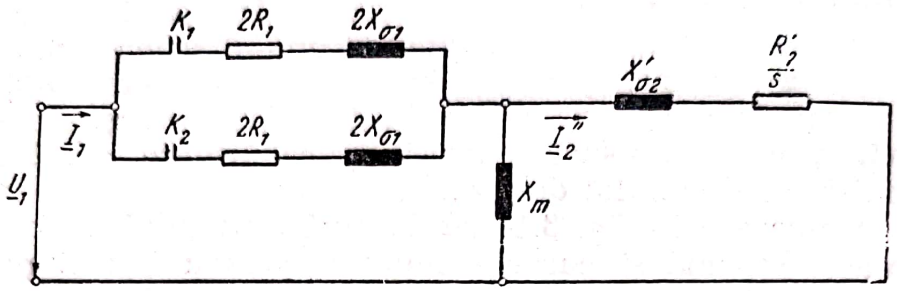


Fig. 3.15. Schema echivalentă a motorului asincron cu două înfășurări statorice parțiale, conectate în paralel.

Schema echivalentă a motorului asincron cu două înfășurări parțiale legate în paralel este reprezentată în fig. 3.15. Pe schemă sînt reprezentate contactele K_1 și K_2. Pornirea se face cu contactorul K_1 închis și cu contactorul K_2 deschis și după terminarea pornirii se închide contactorul K_2 trecînd motorul în funcționare normală.

La pornire, cînd contactorul K_1 este închis și contactorul K_2 este deschis, dacă se neglijează curentul de magnetizare, curentul este

$$\underline{I}''_{2pk} = \frac{\underline{U}_1}{2\underline{Z}_{\sigma 1} + \underline{Z}'_{\sigma 2}} \tag{3.45}$$

unde

$$\underline{Z}_{\sigma 1} = R_1 + jX_{\sigma 1}, \quad \underline{Z}'_{\sigma 2} = \frac{R'_2}{s} + jX'_{\sigma 2}. \tag{3.46}$$

Cuplul electromagnetic la pornire este

$$M_{pk} = \frac{m_1 p}{\omega} R'_2 I''^2_{2pk}. \tag{3.47}$$

Dacă s-ar executa conectarea normală, cînd amîndouă contactoarele K_1 și K_2 sînt închise, curentul și cuplul la pornire ar fi

$$\underline{I}''_{2p} = \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_{\sigma 1} + \underline{Z}'_{\sigma 2}}, \tag{3.48}$$

$$M_p = \frac{m_1 p}{\omega} R'_2 I''^2_{2p}. \tag{3.49}$$

În continuare, se va admite aproximația că la $s=1$

$$\underline{Z}_{\sigma 1} \approx \underline{Z}'_{\sigma 2},$$

Scanned with OKEN Scanner

Rapoartele dintre curent și cuplu în cazul cînd pornirea se face cu o înfășurare parțială, respectiv curent și cuplu în cazul cînd pornirea se face cu înfășurarea normală, sînt

$$\frac{I''_{2pk}}{I''_{2p}} = \frac{Z_{\sigma 1}+Z_{\sigma 2}}{2Z_{\sigma 1}+Z'_{b2}} = \frac{2}{3} \approx 67\%;$$

$$\frac{M_{pk}}{M_p} = \left(\frac{I''_{2pk}}{I''_{2p}}\right)^2 = \left(\frac{2}{3}\right) \approx 45\%.$$

Rezultă că metoda de pornire cu înfășurare parțială, reprezentînd jumătate din întreaga înfășurare, permite să se obțină un curent de pornire redus la 67%, iar cuplul la 45% din valorile stabilite la conectarea directă la rețea a motorului.

Există două variante ale metodei de pornire cu înfășurare statorică parțială: pornirea prin jumătate de înfășurare și pornirea prin două treimi din înfășurare.

Pornirea prin jumătate de înfășurare. Acesta este cazul tratat mai înainte. Tratarea a fost făcută pentru situația idealizată, cînd se dispune de două înfășurări identice, conectate în paralel. În realitate se utilizează jumătate din înfășurarea normală, care este de un tip uzual. De aceea în realitate, în acest caz, apar armonice superioare ale cîmpului magnetic în întrefier, care deformează curba cuplului.

Schema de pornire cu înfășurare parțială și anume cu jumătate din înfășurarea statorică este dată în fig. 3.16.

În fig. 3.17 sînt date curbele curentului și cuplului pentru un motor asincron, la pornirea cu înfășurare jumătate respectiv cu înfășurare întreagă.

Din examinarea curbelor din fig. 3.17 rezultă următoarele observații: la pornirea cu jumătate din înfășurare are loc o reducere a curentului, care ajunge la 67% și a cuplului care ajunge la 45%, din valorile obținute la conectarea directă; în vecinătate de jumătate din turația de sincronism, are loc o reducere însemnată a cuplului, ceea ce constituie un dezavantaj al metodei.

Din examinarea schemei de pornire se constată că schema de pornire necesită un număr redus de contactoare, ceea ce reprezintă un avantaj al metodei și că schema este de tipul cu tranziție, astfel că la conectarea contactorului K_2 nu apare un salt al curentului.

Pornirea prin două treimi din înfășurare. Schema de pornire cu înfășurare parțială utilizînd două treimi din înfășurare este reprezentată în fig. 3.18.

Din examinarea schemei se vede că după conectarea contactorului K_1, sînt alimentate din prima jumătate de înfășurare fazele A_1 și C_1, iar din a doua jumătate fazele B_2 și C_2, adică două treimi din întreaga înfășurare.

Ca urmare, curenții de pornire formează un sistem nesimetric și anume, liniile R și S sînt parcurse de curenți care ajung la 55%, iar linia T este parcursă de un curent care ajunge la 78% din curentul de pornire care se realizează la conectarea directă la rețea. Media aritme-

Scanned with OKEN Scanner

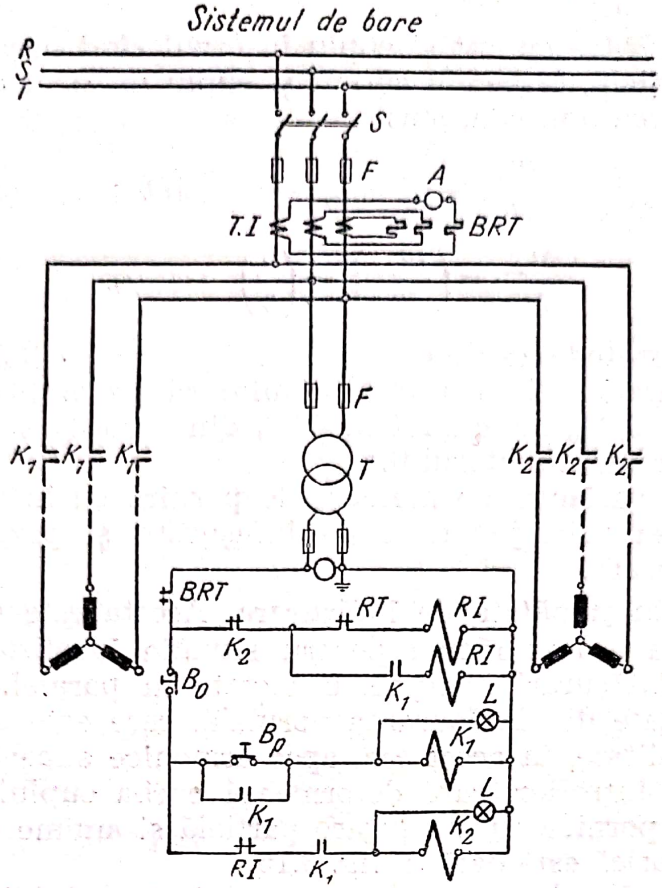


Fig. 3.16. Schema de pornire a motorului asincron cu înfăşurare parţială, şi anume cu jumătate din înfăşurarea statorică:
S — separator; *F* — siguranţe; *TI* — transformator de intensitate; *BRT* — bloc de relee termice; *T* — transformator; *RT* — releu de timp care temporizează închiderea contactorului K_2, încălzindu-l după terminarea pornirii; B_p — buton de pornire; B_0 — buton de oprire; *L* — lampă de semnalizare; *RI* — releu intermediar; K_1, K_2 — contactele contactoarelor.

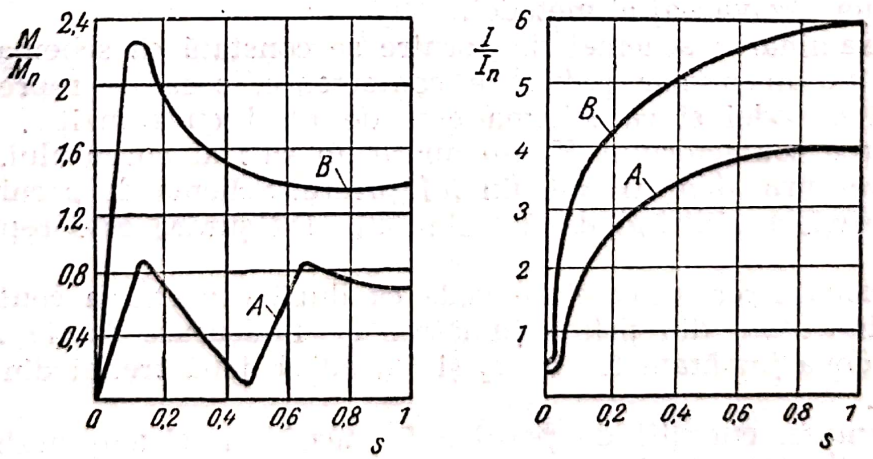


Fig. 3.17. Curbele cuplului electromagnetic şi curentului în funcţie de turaţie, pentru:
A — pornire cu jumătate din înfăşurare; *B* — pornire cu întreaga înfăşurare.

Scanned with OKEN Scanner

tică a curenților reprezintă însă 62,8%, deci este mai mică decît cea care se obține la pornirea cu jumătate din înfășurare, cînd se realizează valoarea de 67%. În fig. 3.19 sînt date curbele curentului și cuplului pentru un motor asincron, la pornirea cu înfășurare de două treimi, respectiv cu înfășurarea întreagă. Din examinarea acestor curbe

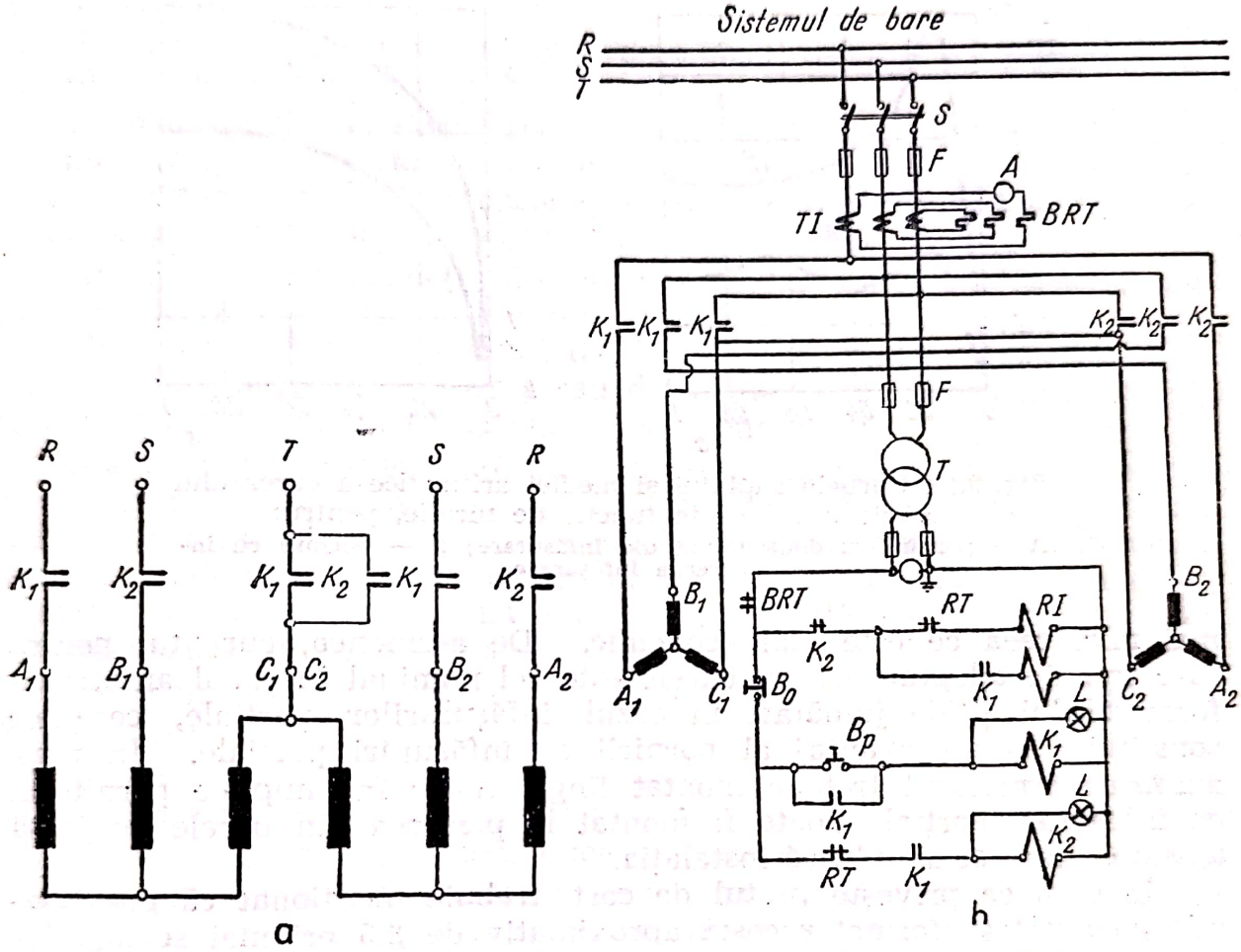


Fig. 3.18. Schema de pornire a motorului asincron cu înfășurare parțială, și anume cu două treimi din înfășurarea statorică:

a — schema fazelor alimentate la pornire; *b* — schema electrică; *S* — separator; *F* — siguranțe; *TI* — transformator de curent; *BRT* — bloc de relee termice; *T* — transformator; *RT* — releu care temporizează închiderea contactorului K_2, închizîndu-l după terminarea pornirii; B_p — buton de pornire; B_0 — buton de oprire; *L* — lampă de semnalizare; *RI* — releu intermediar; K_1, K_2 — contactele contactoarelor.

reiese că reducerea curentului la pornire este de același ordin de mărime ca și în cazul primei scheme, dar forma curbei cuplului este mult îmbunătățită, astfel încît nu mai apare micșorarea cuplului la aproximativ jumătate din turația de sincronism. De aceea ultima metodă este mai convenabilă decît prima.

Pornirea cu înfășurări parțiale prezintă unele avantaje tehnice și economice, care o fac de multe ori preferabilă pornirii cu autotransformator. Astfel în cazul unui autotransformator cu raportul de transformare maxim 0,636, raportul dintre valorile curentului și cuplului la pornirea cu autotransformator și la pornirea prin conectare directă este

Scanned with OKEN Scanner

40,6% respectiv 40,6%, în timp ce în cazul pornirii cu înfășurări parțiale se obține 63%, respectiv 45%. Deci cuplul este ceva mai mare la pornirea cu înfășurări parțiale.

Numărul de contactoare necesar în cazul pornirii prin autotransformator, este de 3, iar în cazul înfășurărilor parțiale este de 2, deci

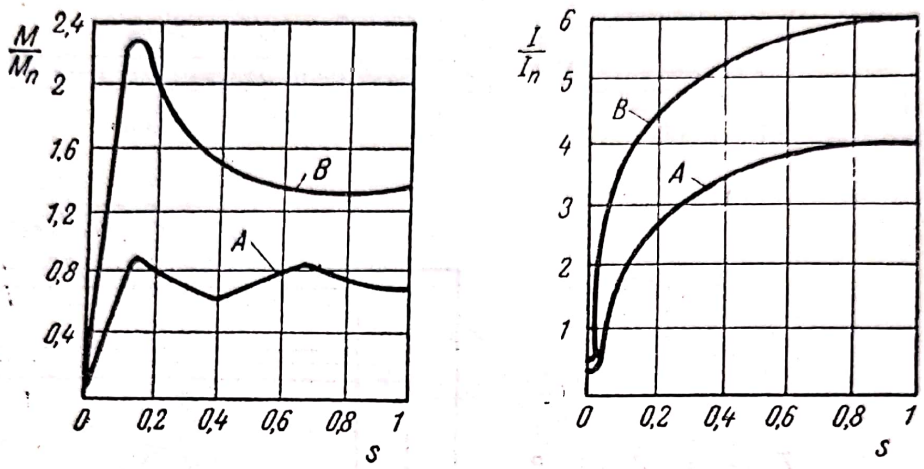


Fig. 3.19. Curbele cuplului și mediei aritmetice a curentului pe cele trei faze, în funcție de turație, pentru:
A — pornire cu două treimi din înfășurare; *B* — pornire cu întreaga înfășurare.

mai mic, ceea ce este mai economic. De asemenea, curentul pentru care trebuie adoptate contactoarele este cel nominal în cazul autotransformatorului și de jumătate în cazul înfășurărilor parțiale, ceea ce constituie un alt avantaj al pornirii cu înfășurări parțiale. În plus, autotransformatorul trebuie montat lîngă motor în timp ce pornitorul cu înfășurări parțiale poate fi montat la plecarea din barele de joasă tensiune, ceea ce simplifică instalația.

În ceea ce privește prețul de cost, trebuie menționat că pornitoarele cu autotransformator costă aproximativ de 2,5 ori mai scump decît pornitoarele cu pornire prin înfășurări parțiale pentru motoare de 30—300 kW de joasă tensiune (pînă la 660 V).

Prin utilizarea sistemului de pornire cu înfășurări parțiale se elimină o serie de construcții necesare la pornitoarele cu autotransformator, la instalații exterioare (casa distribuitorului de joasă tensiune și baraca metalică pentru adăpostirea autotransformatorului).

Această metodă de pornire a dat bune rezultate pentru pornirea motoarelor asincrone cu rotor tip colivie, cu puterea cuprinsă între 80 și 200 kW.

Complicația constructivă a motorului amintită la începutul paragrafului limitează în oarecare măsură răspîndirea metodei.

Această metodă de pornire este mult folosită în unele țări, în special în S.U.A. și în prezent există preocupări pentru extinderea ei în țara noastră și anume în șantierele de petrol și gaze pentru acționarea electrică a stațiilor de pompe pentru țiței și pompe de apă și la stațiile de compresoare de gaze.

Scanned with OKEN Scanner

3.7. AUTOPORNIREA MOTOARELOR ASINCRONE

Se va defini mai întîi ce este autopornirea [1, 2, 11, 26, 27]. Apariția avariilor în sistemele de alimentare cu energie electrică, are ca urmare scăderea sau întreruperea tensiunii de alimentare la bornele consumatorilor.

Sistemele de protecție asigură de obicei restabilirea tensiunii la valorile necesare într-un timp relativ scurt.

La micșorarea sau dispariția tensiunii, cuplul motoarelor scade sau se anulează și turația lor se micșorează. Cînd tensiunea se restabilește, motoarele care nu au fost deconectate de la rețea se accelerează din nou, ajungînd iarăși la regimul normal de funcționare.

Acest regim de funcționare al motoarelor asincrone care constă în accelerarea motoarelor care nu au fost deconectate de la rețea și revenirea lor la regimul normal de funcționare, cînd are loc restabilirea tensiunii, după întreruperea sau dispariția ei din cauza unei avarii, se numește autopornire a motoarelor asincrone.

Statistica defectelor arată că în prezent se produc numeroase deconectări de la rețea ale motoarelor asincrone, datorită reducerii sau dispariției tensiunii, ca urmare a scurtcircuitelor din rețea. În cazul scurtcircuitelor se produce o deconectare masivă a motoarelor a căror protecție de tensiune minimă nu este prevăzută cu temporizare sau este prevăzută cu o temporizare insuficient de mare.

În multe cazuri deconectarea motorului de la rețea nu prezintă incoveniente deosebite. La restabilirea tensiunii motorul este pornit din nou, automat sau prin comandă manuală.

Într-o serie de cazuri însă, deconectarea și oprirea motorului, chiar pentru un timp relativ scurt, duce la incoveniente mari. Astfel, s-a constatat că oprirea ca urmare a deconectării a unor motoare din serviciile auxiliare ale centralelor a dus la numeroase avarii grave în centralele electrice. De aceea mărirea siguranței de funcționare a motoarelor din serviciile auxiliare ale centralelor electrice se realizează în prezent prin asigurarea autopornirii acestor motoare.

Există și alte domenii în care utilizarea autopornirii este necesară. Astfel este cazul motoarelor asincrone din stațiile de compresoare pentru pomparea gazelor necesare întreprinderilor industriale importante. Ca exemplu, vom indica rezultatele studiilor efectuate la stația de pompare a gazelor de la Belgorod—U.R.S.S. care se află pe conducta de gaz Șebelinka—Belgorod—Briansk [1]. În această stație se folosesc compresoare centrifugale. Fiecare compresor este acționat cu un motor asincron de 4 500 kW. În stația de pompare, conform regulei, se găsesc în stare de funcționare două agregate. Schema electrică inițială a stației nu prevede asigurarea autopornirii. Studiile întreprinse au arătat că din acest motiv nu era asigurată o eficiență satisfăcătoare a schemei. Astfel în anul 1964, din cauza întreruperii alimentării cu curent electric s-au înregistrat cinci opriri forțate, în anul 1965 șase opriri, iar în anul 1966 zece opriri. Agregatele erau deconectate prin protecția tensiunii minime după 0,5 secunde de la deconectarea liniei. În majoritatea cazurilor tensiunea se restabilește după 3—3,5 secunde, adică după anclanșarea automată a

Scanned with OKEN Scanner

rezervei (AAR), iar motoarele se opresc și trebuie pornite din nou. Modificarea schemei și introducerea autopornirii a permis evitarea inconvenientelor amintite.

Rezultă că există o serie de cazuri importante în care trebuie asigurată autopornirea.

În continuare, vom arăta mai întîi condițiile pe care trebuie să le îndeplinească schema sistemului energetic și sistemul de protecție pentru ca autopornirea să poată fi realizată. Apoi se vor arăta condițiile care trebuie respectate, pentru ca autopornirea să nu provoace deteriorări motorului sau rețelei.

3.7.1. Condițiile pe care trebuie să le îndeplinească schemele de alimentare și protecție pentru ca autopornirea să fie posibilă

Pentru ca autopornirea să fie posibilă este necesar, în primul rînd, ca motoarele să nu fie deconectate în cazul apariției unor defecte în rețea. Aceasta se realizează prin îndeplinirea următoarelor condiții la motoarele la care se urmărește să se realizeze autopornirea.

Motoarele nu trebuie să fie deconectate instantaneu, ci să nu fie deloc deconectate sau să fie deconectate cu o temporizare suficient de mare și anume superioară celei la care este reglată protecția de scurtcircuit și AAR pentru barele de alimentare a motoarelor.

Pentru motoare protecția contra scurtcircuitelor nu va fi combinată cu protecția contra suprasarcinilor, deoarece dacă ar fi combinate, timpul de reglaj al protecției ar fi scăzut și atunci, la o micșorare a tensiunii, pentru un cuplu rezistent dat, motorul va absorbi un curent mai mare de la rețea și, ca urmare, motorul ar fi deconectat după un timp foarte scurt. În cazul combinării celor două protecții ar apărea în plus și inconvenientul că declanșarea la apariția scurtcircuitelor într-un motor sau de pe fiderul lui de alimentare s-ar produce cu întîrziere, iar în acest interval de timp scăderea tensiunii ar provoca inconveniente și funcționării celorlalte motoare.

Autopornirea se recomandă în special pentru motoarele a căror alimentare se face de la secțiile de bare care sînt prevăzute cu anclanșarea automată a rezervei AAR, sau cu reanclanșarea automată rapidă RAR.

Temporizarea cu care se face anclanșarea automată a rezervei trebuie să fie suficient de mare pentru ca anclanșarea automată a rezervei să nu se facă înainte de separarea scurtcircuitelor. Această temporizare trebuie însă să fie suficient de mică pentru ca turația motoarelor să nu scadă atît de mult, încît să facă imposibilă autopornirea din cazura avariilor care s-ar putea produce.

Trebuie menționat că autopornirea a fost adoptată atît pentru motoarele cu rotorul tip colivie, cît și pentru motoarele cu rotorul bobinat.

Pentru a introduce autopornirea la motor este necesar să se efectueze unele modificări la aparatele de protecție în concordanță cu cele expuse mai înainte. Motorul trebuie să aibă protecția maximală astfel

Scanned with OKEN Scanner

reglată, încît să deconecteze orice scurtcircuit pe linia de alimentare, sau în motor şi să acţioneze asupra sistemului de semnalizare sau a disjunctorului în caz de suprasarcină.

În acest scop protecţia contra scurtcircuitelor se reglează la valoarea curentului de pornire, corespunzător pornirii motorului sub tensiune nominală şi fără dispozitive de pornire, adică: reostat, în cazul motoarelor cu rotor bobinat şi bobină de reactanţă sau autotransformator în cazul motoarelor cu rotor tip colivie.

În ceea ce priveşte protecţia contra suprasarcinilor, aceasta se reglează la o valoare a curentului de declanşare cît mai apropiată de curentul nominal. Valoarea curentului de declanşare, avînd în vedere coeficientul de revenire a releului şi factorul de siguranţă, se adoptă

$$I_{decl}=(1{,}4\ldots1{,}6)\,I_n.$$

Protecţia trebuie să producă de asemenea, în caz de reducere a tensiunii, deconectarea motoarelor mai puţin importante, asigurînd astfel autopornirea motoarelor mai importante.

În continuare, se vor examina următoarele probleme: puterea limită a motoarelor asincrone, dintr-o instalaţie, care pot autoporni; verificarea pentru o instalaţie dată dacă un motor poate autoporni.

3.7.2. Studiul fenomenelor care apar la autopornire

În fig. 3.20 este indicată schema de alimentare a motoarelor. Examinarea condiţiilor de autopornire trebuie făcută pentru condiţiile cele mai defavorabile. De aceea se va presupune că tensiunea dispare complet de pe sistemul de bare B din fig. 3.20 şi revine după un timp t, cînd are loc AAR (anclanşarea automată a rezervei). În calcule acest timp se stabileşte în funcţie de timpii din schemele de protecţie şi din schema AAR.

Autopornirea diferă de pornire prin aceea că la aplicarea tensiunii de alimentare, motorul are o turaţie n_a diferită de zero şi deci o alunecare s_a mai mică decît $s=1$.

Este necesar să se cunoască la ce turaţie ajunge motorul după timpul t de la întreruperea tensiunii. Trebuie deci să se cunoască curba $n=f(t)$ după întreruperea alimentării motorului, denumită curbă de oprire. Pentru a stabili această curbă trebuie cunoscută ecuaţia dinamică fundamentală.

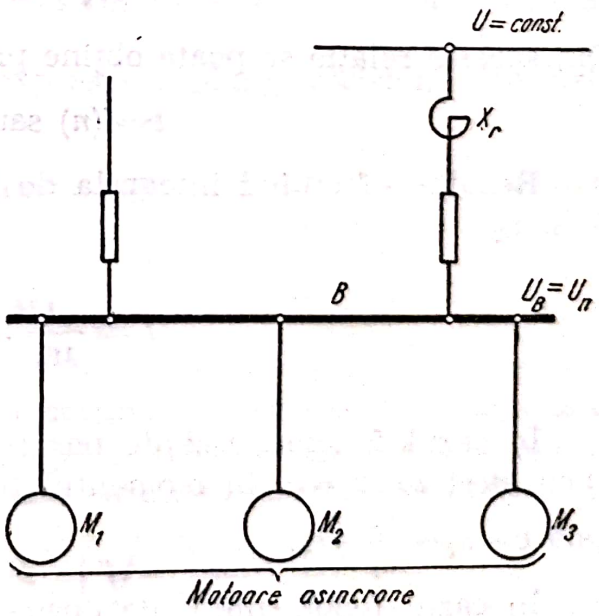


Fig. 3.20. Schema alimentării motoarelor cu autopornire.

Momentul dinamic M_d este egal cu diferența dintre momentul motor M_{mot} și momentul static rezistent M_r și imprimă rotorului accelerația unghiulară $\frac{d\Omega}{dt}$, unde Ω este viteza unghiulară. Dacă se notează cu J momentul de inerție, atunci ecuația de mișcare este

$$J\frac{d\Omega}{dt} = M_{mot} - M_r = M_d, \tag{3.51}$$

unde

$$J = \frac{GD^2}{4};$$

GD^2 este momentul de giratie, în $kg \cdot m^2$;
G — masa, în kg;
M — cuplurile, în Nm.

Ecuația (3.51) se va pune sub forma

$$\frac{J}{M_n} : \frac{d\Omega}{dt} = \frac{M_d}{M_n}.$$

Pentru simplificare, cuplul și viteza vor fi exprimate în unități raportate la valorile de referință, adică se va nota:

$$m_d = \frac{M_d}{M_n}; \quad m_{mot} = \frac{M_{mot}}{M_n}; \quad m_r = \frac{M_r}{M_n}; \quad v = \frac{\Omega}{\Omega_1} = \frac{n}{n_1},$$

unde n_1 este turația de sincronism, și deci

$$\frac{J}{M_n} \cdot \frac{dv}{dt} = \frac{m_d}{\Omega_1}.$$

Din această relație se poate obține prin integrare

$$t = f(n) \text{ sau } n = F(t).$$

Rezultă, efectuînd integrala de la momentul inițial v_1 la momentul final v_2:

$$t = \frac{J}{M_n} \cdot \Omega_n \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{m_d}. \tag{3.52}$$

În cazul fenomenului de pornire, în momentul inițial motorul este oprit, deci $v = v_1 = 0$; în momentul final dacă se ajunge la turația nominală $v = v_2 = \frac{n_n}{n_1} \approx 1$.

În cazul fenomenului de oprire, plecînd de la turația nominală în momentul inițial $v = v_1 = \frac{n_n}{n_1} \approx 1$, iar în momentul final cînd motorul s-a

Scanned with OKEN Scanner

oprit $v=v_2=0$. Dar în cazul studiat, rețeaua a fost deconectată, deci $M_{mot}=0$ și $m_d=-m_r$, iar din ecuația (3.52) se obține

$$t=\frac{J}{M_n}\Omega_n\int_1^0\frac{dv}{-m_r}. \tag{3.53}$$

Pentru momente intermediare înainte de oprirea completă

$$t=\frac{J}{M_n}\Omega_n\int_{v_1}^{v_2}\frac{dv}{-m_r}. \tag{3.54}$$

Se va nota

$$T_a=\frac{J\Omega_n}{M_n}, \tag{3.54 a}$$

mărime denumită constanta mecanică de timp a motorului și mecanismului acționat și se va raporta timpul în funcție de această constantă de timp, adică în locul timpului t se va introduce timpul relativ

$$t_r=\frac{t}{T_a}. \tag{3.55}$$

Înlocuind notația din (3.55) în ecuația (3.54), rezultă

$$t_r=\frac{t}{T_a}=-\int_{v_1}^{v_2}\frac{dv}{m_r}. \tag{3.56}$$

Cunoscînd dependența cuplului rezistent de viteză, se poate calcula analitic sau grafic $t=f(v)$.

Se va considera cazul în care expresia cuplului rezistent raportat este de forma

$$m_r=m_{r\,por}+(1-m_{r\,por})v^2, \tag{3.57}$$

unde

$$m_{r\,por}=\frac{M_{r\,por}}{M_n},$$

iar $M_{r\,por}$ reprezintă cuplul rezistent la pornire al mecanismului acționat.

Introducînd expresia (3.57) în integrala (3.56) și efectuînd integrarea între limitele v și v_n corespunzătoare turațiilor n și n_n, se obține

$$\frac{t}{T_a}=\frac{1}{\sqrt{m_{r\,por}(1-m_{r\,por})}}\left[\text{arc tg}\left(\sqrt{\frac{1-m_{r\,por}}{m_{r\,por}}}\frac{n_n}{n_1}\right)-\right.$$
$$\left.-\text{arc tg}\left(\sqrt{\frac{1-m_{r\,por}}{m_{r\,por}}}\frac{n}{n_1}\right)\right]. \tag{3.58}$$

În fig. 3.21 sînt date curbele de oprire pentru motoare care acționează mecanisme cu cuplul rezistent de tip ventilator.

Constanta mecanică de timp a motorului și mecanismului se poate calcula cu formula (3.54 a) sau, sub o formă convenabilă pentru calculele practice

$$T_a = \frac{GD^2_{mot} + GD^2_{mec}}{364\, P_n \cdot 10^3}, \tag{3.59}$$

unde s-a notat:

GD^2_{mot}, GD^2_{mec} — momentele de giratie ale motorului respectiv mecanismului acționat, în kg·m².

P_n — puterea nominală a motorului, în kW.

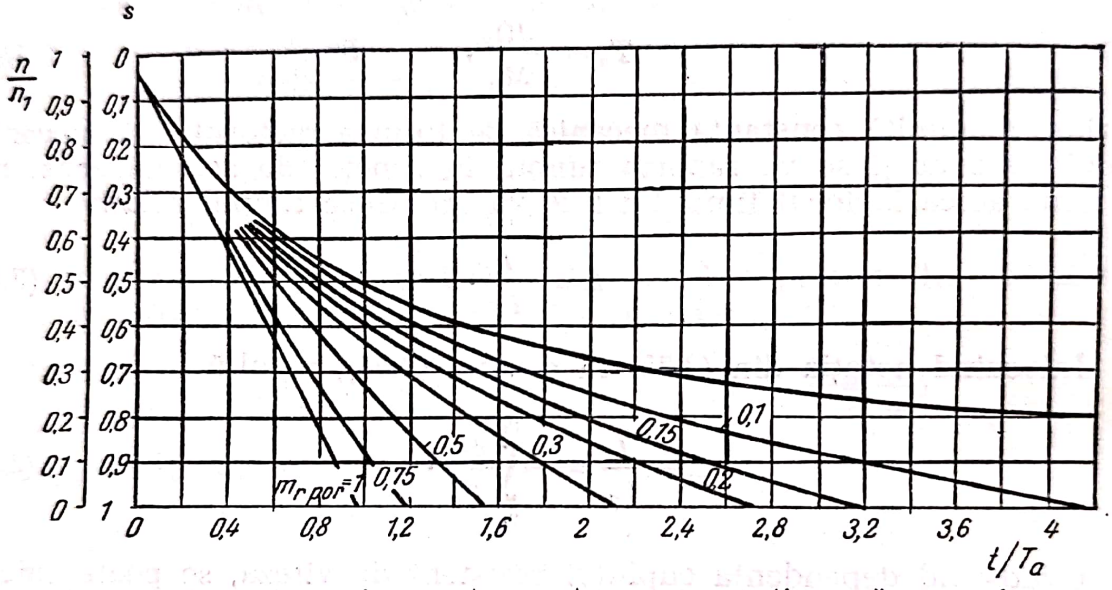


Fig. 3.21. Curbele de oprire pentru motoare care acționează mecanisme cu cuplu rezistent de tip ventilator. Pentru cazul cuplului rezistent constant, $m_{r\,por}=1$.

În figurile 3.22 și 3.23 sînt date curbele de oprire pentru anumite agregate importante din centralele electrice, iar în figurile 3.24 și 3.25 sînt date curbele de oprire pentru alte agregate importante în industrie.

Cazul cuplului rezistent constant, $M_r = M_n$, se deduce din cazul exprimat prin relația (3.58), punînd $m_{r\,por}=1$ în expresia (3.58).

Aceste curbe permit să se știe care este turația unui motor asincron care acționează un mecanism, după timpul t de la deconectarea motorului de la rețea.

3.7.3. Ridicarea experimentală a curbelor de oprire

Curba de oprire poate fi ridicată prin oscilografierea turației la deconectarea motorului, ceea ce se poate realiza oscilografiind tensiunea dată de un generator tahometric montat pe arborele agregatului.

Scanned with OKEN Scanner

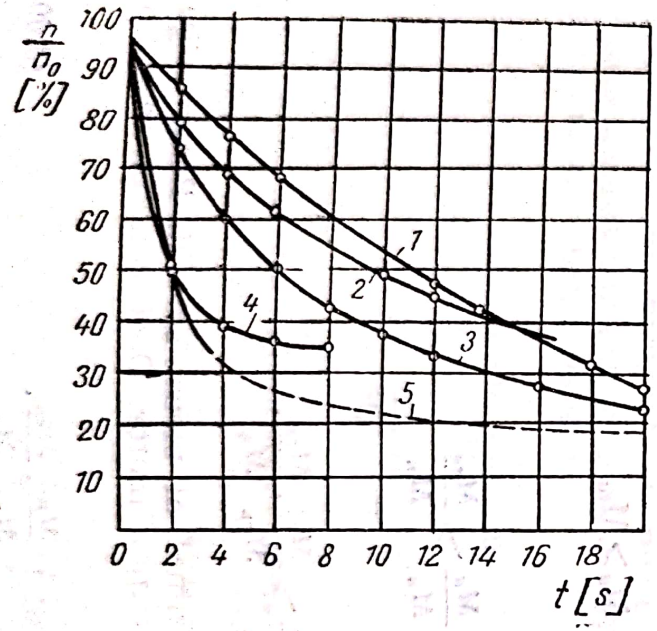


Fig. 3.22. Curbele de oprire ale mecanismelor din serviciile interne ale centralelor [2]:

1 — curba de oprire a ventilatorului de gaze; *2* — curba de oprire a ventilatorului de aer; *3* — curba de oprire a exhaustorului; *4* — curba de oprire a pompei de alimentare; *5* — curba de oprire a pompei de circulație.

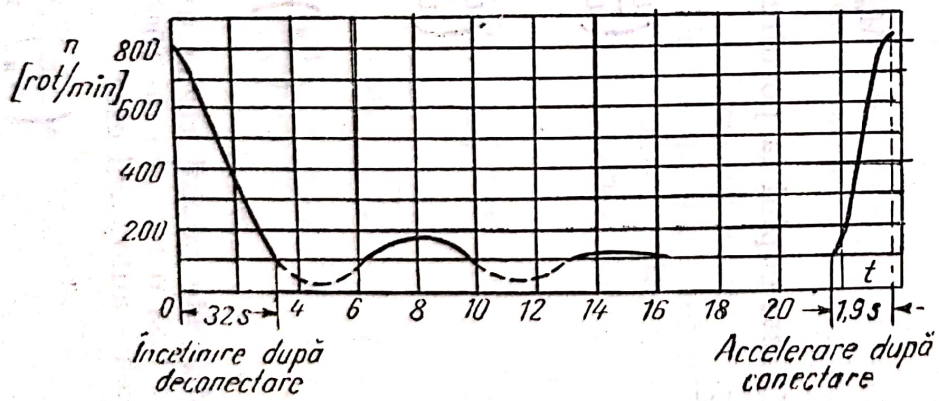


Fig. 3.23. Curba de oprire a morii cu bile [2].

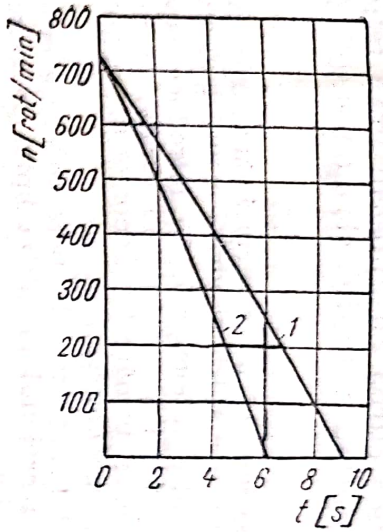


Fig. 3.24. Curba de oprire a compresorului [2]:

1 — compresor orizontal; *2* — compresor vertical.

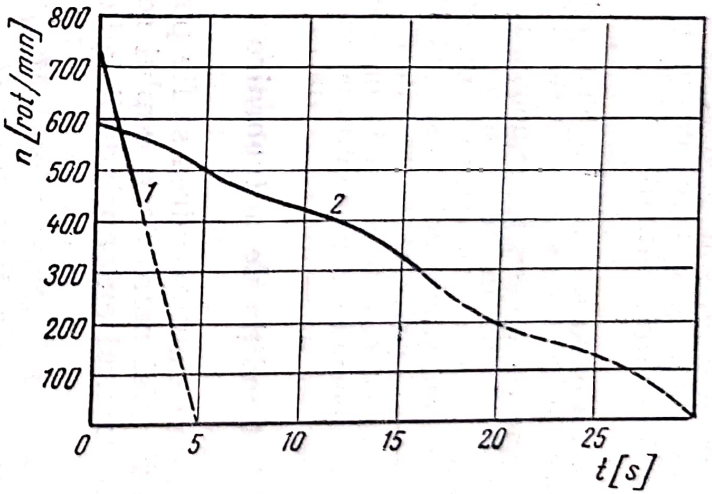


Fig. 3.25. Curba de oprire a balansierului petrolier [2]:

1 — comanda în grup cu un motor de 59 kW;
2 — comanda în grup cu un motor de 7,3 kW.

Scanned with OKEN Scanner

De asemenea, este posibil să se ridice curba cu ajutorul unui tahometru de mînă şi a unui cronometru notînd turaţiile şi momentele la care s-a făcut măsurătoarea.

Pentru aceasta se lipeşte o hîrtie albă pe geamul tahometrului, iar hîrtia este astfel tăiată încît să permită observarea diviziunilor scării şi vîrful acului indicator.

O persoană urmăreşte cronometrul, iar alta tahometrul. Se introduce capul axului tahometrului în capul arborelui agregatului şi se citeşte turaţia la care funcţionează motorul. La comanda persoanei care urmăreşte cronometrul se deconectează motorul şi concomitent se declanşează cronometrul.

La anumite intervale de timp de exemplu 1...2 secunde, persoana care urmăreşte tahometrul face la comandă un semn cu creionul pe hîrtia lipită pe geamul cadranului tahometrului în dreptul acului arătător.

3.7.4. Condiţia de autopornire

Pentru ca autopornirea să fie posibilă, cuplul dezvoltat de motor trebuie să fie mai mare decît cuplul rezistent produs de mecanismul acţionat în momentul autoaprinderii, adică

$$M_{mot} > M_{ra}.$$

Dar cuplul M_{mot} dat de motor la tensiunea U_a la care se produce autopornirea este

$$M_{mot} = \left(\frac{U_a}{U_n}\right)^2 M_a,$$

unde M_a este cuplul la pornire sub tensiunea nominală.

Deci

$$\left(\frac{U_a}{U_n}\right)^2 M_a > M_{ra}$$

sau

$$\left(\frac{U_a}{U_n}\right)^2 \frac{M_a}{M_n} > \frac{M_{ra}}{M_n}$$

sau

$$\left(\frac{U_a}{U_n}\right)^2 \frac{M_a}{M_n} > \frac{M_{ra}}{M_{rn}} \cdot \frac{M_{rn}}{M_n},$$

unde M_{rn} este cuplul rezistent nominal al mecanismului. Pentru siguranţă se lasă o rezervă de 10% la cuplul motor. Deci, condiţia ca motorul să poată autoporni este

$$\left(\frac{U_a}{U_n}\right)^2 \frac{M_a}{M_n} \geqslant 1{,}1 \frac{M_{ra}}{M_{rn}} \cdot \frac{M_{rn}}{M_n}, \qquad (3.60)$$

Scanned with OKEN Scanner

unde:

$\frac{U_a}{U_n}$ este raportul dintre tensiunea la bornele motorului în momentul autopornirii și tensiunea nominală;

$\frac{M_a}{M_n}$ — raportul dintre cuplul dat de motor în momentul autopornirii, dacă tensiunea ar avea valoarea nominală, și cuplul nominal;

$\frac{M_{ra}}{M_{rn}}$ — raportul dintre cuplul rezistent al mecanismului acționat în momentul autopornirii și cuplul rezistent nominal;

$\frac{M_{rn}}{M_n}$ — raportul dintre cuplul rezistent nominal al mecanismului acționat și cuplul nominal al motorului sau, ceea ce este același lucru, raportul celor două puteri nominale corespunzătoare.

Se va nota cu U_n valoarea eficace a tensiunii de fază, iar cu U_{nl} — valoarea eficace a tensiunii de linie. Diferitele mărimi care intervin în relația (3.60) nu sînt cunoscute și deci trebuie calculate.

De pe curba de oprire a mecanismului se determină turația n_a sau alunecarea s_a, la timpul t de la dispariția tensiunii pînă la revenirea acesteia. Acest timp t se determină în funcție de timpii din schemele de protecție și din schema AAR. Pentru siguranță, se adoptă pentru t o valoare mai mare.

Cunoscînd turația sau alunecarea, se determină de pe caracteristica mecanică a motorului $M=f(s)$ cuplul M_a corespunzător alunecării s_a și deci se obține $\frac{M_a}{M_n}$.

Caracteristica mecanică $M=f(s)$ a fiecărui motor poate fi ridicată experimental sau poate fi construită utilizînd expresia cuplului și introducînd valorile parametrilor deduse pe baza datelor din catalog sau pe baza încercărilor experimentale. Aproximativ, curba $M=f(s)$ se poate trasa cunoscînd patru puncte:

$$s=0,\ \frac{M}{M_n}=0; \qquad s=s_n,\ \frac{M}{M_n}=1;$$

$$s=s_K,\ \frac{M}{M_n}=\frac{M_k}{M_n}; \qquad s=1,\ \frac{M}{M_n}=\frac{M_p}{M_n}.$$

Rămîne să se calculeze tensiunea U_a. În acest scop este necesar să se cunoască curentul absorbit în momentul autopornirii.

Curentul rotoric al motorului, raportat la primar, este dat de relația (3.3 b).Cu o aproximație prin adaos, adică în mod acoperitor, se va neglija rezistența primarului și deci

$$I'_2=\frac{U_1}{\sqrt{\left(c_1\frac{R'_2}{s}\right)^2+(X_{\sigma 1}+c_1X'_2)^2}}.$$

Scanned with OKEN Scanner

Ținînd seama de expresia (3.6 b), se obține

$$I'_2 = \frac{U_1}{(X_{\sigma 1} + c_1 X'_{\sigma 2}) \sqrt{1 + \left(\frac{s_K}{s}\right)^2}}. \tag{3.61}$$

Se va neglija curentul de magnetizare și se va considera aproximativ că valoarea curentului de pornire la tensiunea nominală este

$$\frac{U_1}{X_k} = I_p; \; (X_k = X_{\sigma 1} + c_1 X'_{\sigma 2}). \tag{3.62}$$

Atunci ecuația (3.61) dă curentul la autopornire, la tensiunea nominală,

$$I_a = \frac{I_p}{\sqrt{1 + \left(\frac{s_K}{s}\right)^2}}. \tag{3.63}$$

Căderea de tensiune de la rețeaua de putere infinită pînă la sistemul de bare B de alimentare a motorului (fig. 3.20) este determinată de curentul total absorbit la revenirea tensiunii. Acest curent total I_{at} este suma dintre curentul de autopornire absorbit de motoare $\sum_1^n I_a$ și curentul I_r absorbit de celelalte receptoare cu impedanță constantă, care rămîn conectate (lămpi, rezistoare etc.), și care absorb aproximativ curentul nominal,

$$I_{at} = I_r + \sum_1^n I_a, \tag{3.64}$$

toate mărimile din membrul al doilea fiind cunoscute.

În calcule se vor neglija impedanțele cablurilor de alimentare și de asemenea se vor neglija toate rezistențele; astfel, rezultatele sînt acoperitoare, deci prezintă siguranță.

În acest caz, reactanța echivalentă a receptorului, presupus legat în stea, și conectat la barele B, este

$$X_e = \frac{U_{nB}}{\sqrt{3}\, I_{at}}, \tag{3.65}$$

unde U_{nB} este valoarea nominală a tensiunii de linie la barele B.

Reactanța rețelei, de la barele de putere infinită pînă la barele B de alimentare a motoarelor, este cunoscută și se va nota cu X_{er}; aceasta poate fi reprezentată, de exemplu, de reactanța X_r a unei bobine de reactanță și atunci $X_{er} = X_r$.

Curentul care trece prin această porțiune a rețelei este

$$I = \frac{U_{n1}}{\sqrt{3}\,(X_e + X_{er})}.$$

Tensiunea de fază la barele B, egală cu tensiunea la bornele motoarelor, este

$$U_B = U_a = X_e I.$$

Scanned with OKEN Scanner

Din ultimele două relaţii rezultă

$$\frac{U_a}{U_n} = \frac{X_e}{X_e + X_{er}}, \tag{3.66}$$

mărimile din membrul al doilea fiind cunoscute.

Raportul $\frac{M_{ra}}{M_{rn}}$ al mecanismului acţionat trebuie determinat pentru fiecare agregat.

Pentru mecanismele cu cuplu rezistent constant,

$$\frac{M_{ra}}{M_{rn}} = 1. \tag{3.67}$$

Pentru mecanismele de tip ventilator,

$$\frac{M_{ra}}{M_{rn}} = a + b(1 - s_a)^2, \tag{3.67a}$$

unde $a+b=1$; dacă nu se cunosc valori mai exacte, se adoptă aproximativ

$$a = 0{,}15; \quad b = 0{,}85. \tag{3.67 b}$$

Pentru pompe cu contrapresiuni hidrostatice (cum este cazul presiunii dintr-un cazan asupra pompei de alimentare), raportul $\frac{M_{ra}}{M_{rn}}$ poate fi determinat din fig. 3.26.

Raportul $\frac{M_{rn}}{M_n}$ se ia din datele mecanismului.

Fracţiile din inegalitatea (3.60) sînt deci cunoscute, relaţia putînd fi acum verificată.

Motoarele pentru care inegalitatea (3.60) este satisfăcută vor autoporni. Cele pentru care nu este satisfăcută îşi vor încetini turaţia în continuare, pînă cînd vor fi deconectate de sistemul de protecţie.

Dacă autopornirea nu se poate realiza la toate motoarele, atunci se poate proceda în unul din următoarele moduri:

— se va reduce numărul de motoare cu autopornire, şi anume se vor elimina din schema de autopornire acele motoare care acţionează mecanisme de importanţă mică;

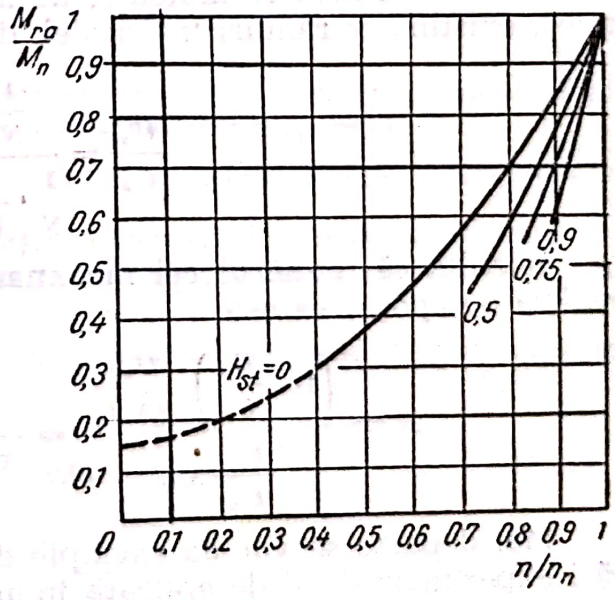


Fig. 3.26. Curba cuplului rezistent al pompelor de contrapresiune hidrostatică, pentru diferite valori ale presiunii statice.

— se va reduce impedanța transformatoarelor sau reactoarelor din sistemul de alimentare, prevăzînd în acest scop unități mai mari;

— se va reduce timpul de revenire a tensiunii, dacă schema de protecție a rețelei permite aceasta;

— se vor înlocui motoarele la care nu se poate realiza autopornirea, prin motoare cu caracteristici convenabile sau prin motoare de putere mai mare.

Dacă de la un sistem de bare se alimentează mai multe motoare identice care acționează mecanisme identice, este necesar să se determine care este numărul de motoare pentru care se poate asigura autopornirea. Pentru aceasta se calculează $\frac{M_a}{M}$, $\frac{M_{ra}}{M_{rn}}$, $\frac{M_{rn}}{M_n}$, se introduc în relația (3.60) și se obține valoarea minimă $\frac{U_a}{U_n}$ pentru care este posibilă autopornirea.

Dacă ar exista un singur motor, atunci din relația (3.65) s-ar obține

$$X_e = \frac{U_{nB}}{\sqrt{3}\, I_a},$$

unde I_a este dat de relația (3.63).

În cazul unui singur motor se obține din relația (3.66)

$$\frac{U_a}{U_n} = \frac{\frac{U_{nB}}{\sqrt{3}\, I_a}}{\frac{U_{nB}}{\sqrt{3}\, I_a} + X_{er}}.$$

Dacă ar exista N motoare, atunci reactanța X_e ar fi de N ori mai mică, existînd N ramuri în paralel, deci:

$$\frac{U_a}{U_n} = \frac{\frac{1}{N} \cdot \frac{U_{nB}}{\sqrt{3}\, I_a}}{\frac{1}{N} \cdot \frac{U_{nB}}{\sqrt{3}\, I_a} + X_{er}}.$$

Rezultă că numărul cel mai mare de motoare pentru care se poate realiza autopornirea este

$$N = \frac{\left(1 - \frac{U_a}{U_n}\right) \frac{U_{nB}}{\sqrt{3}\, I_a}}{\frac{U_a}{U_n} X_{er}} = \frac{1}{X_e + X_{er}} \cdot \frac{1}{\frac{U_a}{U_n}} \cdot \frac{U_{nB}}{\sqrt{3}\, I_a}. \qquad (3.68)$$

Mai departe se vor da exemple de calcul și exemple ale unor încercări experimentale și de aplicații industriale.

Exemplul 1. Se va indica după lucrarea [26] un exemplu de calcul al posibilității de autopornire a unor motoare asincrone din serviciile interne ale unei centrale. Se consideră cazul unei centrale electrice în care o secție de bare de 0,4 kV pentru servicii interne este alimentată prin două transformatoare, unul în funcțiune

Scanned with OKEN Scanner

iar celălalt în rezervă, cu anclanşare automată rapidă (AAR). Datele fiecărui transformator sînt următoarele: puterea S_n=630 kVA; tensiunea de scurtcircuit u_k=6%. Amîndouă transformatoare sînt alimentate la tensiunea de linie de 6 kV, de la sistemul de bare de putere infinită a centralei.

Secţia de bare pentru serviciile interne ale centralei alimentează cinci motoare, care acţionează anumite mecanisme. Datele motoarelor şi ale mecanismelor sînt trecute în tabelul 3.1. Se cere să se verifice dacă autopornirea acestor motoare este posibilă la revenirea tensiunii după t=2 s.

Tabelul 3.1

Caracteristicile motoarelor asincrone din exemplul 1

Nr. motorului	P_n kW	s_n	n rot/min	I_n A	$\frac{I_p}{I_n}$	$\frac{M_p}{M_n}$	$\frac{M_K}{M_n}$	GD^2 kg·m²
1	160	0,019	1 500	296	6	1,05	2	13,5
2	125	0,010	750	234	4,2	1,50	2,3	65
3	100	0,010	750	190	5,5	1,55	2,5	60
4	75	0,018	1 500	138	6,5	1,2	2,2	16
5	55	0,020	750	110	6,5	1,2	1,8	75
2a	160	0,017	750	303	5,5	1,8	2,5	75

Vom efectua verificarea condiţiilor de autopornire pentru primul motor. Cu ajutorul formulei (3.59), se determină constanta mecanică de timp a agregatului:

$$T_{a1}=\frac{(13{,}5+159)\cdot 1\,500^2}{364\cdot 160\cdot 10^3}=6{,}66 \text{ s};$$

deci, la t=2 s se obţine $\frac{t}{T_{a1}}=\frac{2}{6{,}66}=0{,}300$.

Mecanismul antrenat de motorul *1* este un ventilator; conform relaţiei (3.67a), cuplul rezistent la pornire raportat la cuplul nominal este $m_{r\,por}$=0,15.

Pentru $\frac{t}{T_{a1}}=0{,}300$ şi $m_{r\,por}=0{,}15$, se obţine din curbele de oprire reprezentate în fig. 3.21 alunecarea s_a=0,25, la care ajunge motorul în intervalul de timp de t=2 *s* scurs de la dispariţia tensiunii pînă la revenirea acesteia, deci în momentul cînd are loc autopornirea.

Alunecarea critică a motorului *1* se determină cu expresia (3.26) în care se va introduce după tabelul 3.1:

$$b_n=\frac{M_K}{M_n}=2;\ s_n=0{,}019;\ m_c=1;$$

deci

$$s_k=0{,}019\,(2+\sqrt{2^2-1})=0{,}071.$$

Curentul de autopornire se poate calcula cu formula (3.63), în care se va introduce după tabelul 3.1:

$$I_p=6\cdot 296=1\,776 \text{ A};$$

deci

$$I_{a1}=\frac{1\,776}{\sqrt{1+\left(\frac{0{,}071}{0{,}25}\right)^2}}=1\,708\ \text{A}.$$

Analog se găseşte curentul pentru celelalte motoare.
Însumîndu-se toţi curenţii se obţine, conform relaţiei (3.64):

$$I_{at}=5\,218\ \text{A}.$$

Introducînd în relaţia (3.65) curentul $I_{at}=5\,218$ A şi tensiunea $U_{n1}=380$ V, se obţine reactanţa echivalentă totală a motoarelor,

$$X_e=\frac{380}{\sqrt{3}\cdot 5\,218}=0{,}042\ \Omega.$$

Reactanţa porţiunii reţelei cuprinse între sistemul de bare de putere infinită şi sistemul de bare de la care sînt alimentate motoarele va fi constituită numai de reactanţa transformatorului, care se calculează cu formula cunoscută. Reactanţa transformatorului raportată la partea de joasă tensiune, adică la partea unde sînt conectate motoarele, se poate calcula cu relaţia cunoscută

$$X_r=\frac{U_k U_1^2}{S_n}\cdot\frac{1}{100}\quad\frac{6\cdot(0{,}4\cdot 10^3)^2}{630\cdot 10^3}\cdot\frac{1}{100}=0{,}0152\ \Omega.$$

Raportul dintre tensiunile la barele de alimentare a motoarelor, în momentul autopornirii şi în regim nominal, se poate calcula cu relaţia (3.66) şi se obţine

$$\frac{U_a}{U_n}=\frac{0{,}043}{0{,}043+0{,}0153}=0{,}73.$$

În fig. 3.27 sînt date caracteristicile mecanice $M=f(s)$ pentru cele cinci motoare (construite cunoscînd pentru fiecare caracteristică patru puncte, conform datelor din catalog). Pentru motorul *1*, la alunecarea $s_a=0{,}25$ la care are loc autopornirea, se găseşte

$$\frac{M_a}{M_n}=1{,}64.$$

Raportul dintre cuplul rezistent al mecanismului la alunecarea $s_a=0{,}25$ şi cuplul rezistent în regim nominal se poate calcula cu relaţia (3.67 a):

$$\frac{M_{ra}}{M_{rn}}=0{,}15+0{,}85(1-0{,}25)^2=0{,}63.$$

Raportul dintre cuplurile rezistente nominale ale mecanismului şi motorului, conform datelor din tabel, este:

$$\frac{M_{rn}}{M_n}=\frac{130}{160}=0{,}81.$$

Scanned with OKEN Scanner

Înlocuind valorile găsite în cei doi membri ai relației (3.60) se găsește

$$\left(\frac{U_a}{U_n}\right)^2 \cdot \frac{M_a}{M_n} = (0{,}736)^2 \cdot 1{,}64 = 0{,}890;$$

$$1{,}1 \frac{M_{ra}}{M_{rn}} \cdot \frac{M_{rn}}{M_n} = 1{,}1 \cdot 0{,}63 \cdot 0{,}81 = 0{,}561.$$

Deci inegalitatea (3.60) este îndeplinită și astfel se realizează autopornirea motorului *1*.

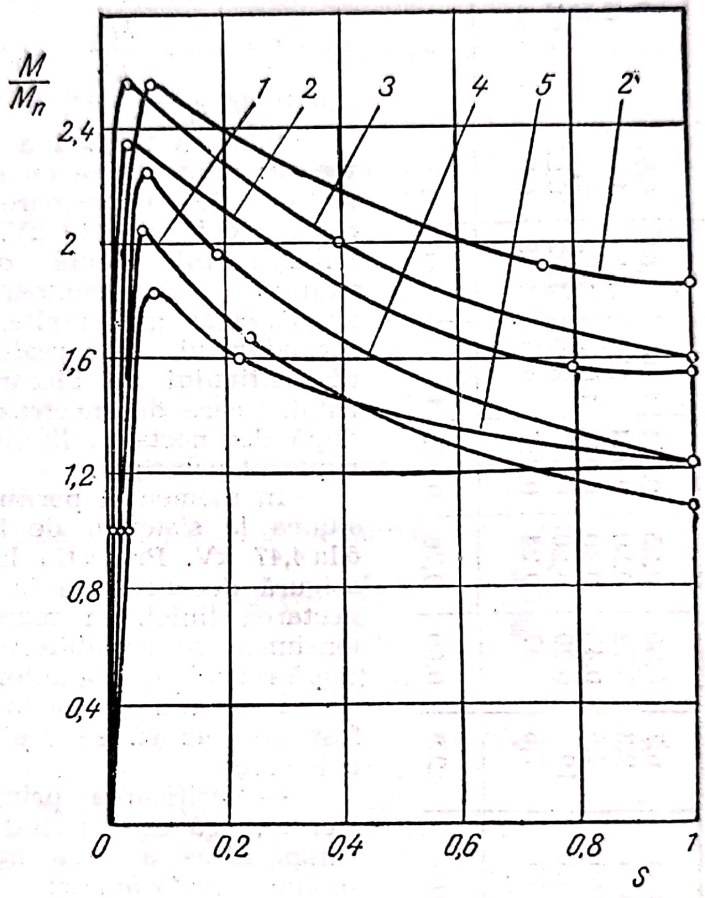


Fig. 3.27. Curbele cuplului electromagnetic în funcție de alunecare, pentru cele cinci motoare din exemplul de calcul.

În mod analog se efectuează calculele pentru celelalte motoare, iar datele sînt trecute în tabelul 3.1 a, din care se constată că la motorul 2, care acționează c moară cu bile, nu se poate realiza autopornirea. Deci acest motor trebuie prevăzut cu un sistem de protecție, care să-l deconecteze, spre a permite autopornirea celorlalte motoare, urmînd ca acest motor să fie pornit ulterior.

În cazul în care procesul tehnologic cere însă și autopornirea acestui motor, atunci soluția cea mai simplă, care să permită obținerea acestui rezultat, este înlocuirea motorului de 125 kW, cu unul de o putere mai mare, de exemplu de 160 kW. Acest motor este trecut în tabelul 3.1 cu notația 2a. Efectuarea calculelor pentru acest motor arată că se realizează autopornirea.

Exemplul 2. Se va indica după lucrarea [1] un exemplu de calcul al autopornirii motoarelor a două agregate pentru pomparea gazelor, indicîndu-se și modificările necesare ale schemei inițiale, pentru a se putea realiza autopornirea. În

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 3.1 a

Condițiile de autopornire a motoarelor din exemplul 1

Nr. crt.	Mecanismul: Felul	Mecanismul: Puterea kW	Mecanismul: GD^2 kg·m²	Puterea motorului kW	T_a s	$\frac{t}{T_a}$	s_a	s_K	I_a A	$\frac{M_a}{M_n}$	$\frac{M_{ra}}{M_{rn}}$	$\left(\frac{U_a}{U_n}\right)^2 \cdot \frac{M_a}{M_n}$	$1{,}1\frac{M_{ra}}{M_n}$	Dacă se poate realiza autopornirea
1	Ventilator	130	169	160	6,7	0,30	0,25	0,071	1 708	1,64	0,64	0,89	0,57	da
2	Moară	100	165	125	2,8	0,72	0,80	0,044	980	1,54	1	0,83	0,88	nu
3	Pompă	85	230	100	4,5	0,45	0,40	0,048	1 030	1,95	0,44	1,06	0,41	da
4	Ventilator	55	105	75	10	0,20	0,20	0,075	830	1,92	0,69	1,04	0,56	da
5	Ventilator	50	190	55	7,5	0,27	0,24	0,086	670	1,58	0,63	0,85	0,63	da
2a	Moară	—	—	160	2,9	0,69	0,76	0,082	1 640	1,86	1	1,01	0,69	da

calitate de agregate pentru pomparea gazelor, sînt folosite în acest caz compresoare centrifugale de tipul 280-11-1, acționate de motoare AZ-4500-1500.

Datele din prospectul motorului sînt următoarele: puterea nominală P_n= =4 500 kW; tensiunea nominală U_{n1}= =6 000 V; curentul nominal statoric I_n=522 A; curentul de pornire statoric I_p=2 300 A; turația nominală n= =1 490 rot/min; cos φ=0,86; durata pornirii t_p=12 s; $\frac{M_K}{M_n}=b_n=2{,}2$; alunecarea nominală s_n=0,0067.

Schema inițială a stației este următoarea: alimentarea cu energie electrică a stațiilor de compresoare este realizată cu două circuite de 110 kV. Instalația de distribuție este făcută după o schemă în punte: fără întreruptoare pe latura tensiunii celei mai înalte. Protecția transformatorului este realizată cu ajutorul dispozitivului de blocare și a separatorului, care deconectează transformatorul după deconectarea liniilor de către întreruptorul principal.

În momentul pornirii motorului, tensiunea la sistemul de bare scade de la 6 la 4,47 kV. Protecția la tensiune minimă asigură deconectarea la 0,5 s după deconectarea liniei. În majoritatea cazurilor, tensiunea se restabilește după 3...3,5 s (după reanclanșarea automată rapidă RAR).

Pentru a se asigura autopornirea, a fost necesar să se realizeze următoarele obiective:

— verificarea, prin calcul și experimental, că este posibil să se efectueze autopornirea a două agregate de la un singur transformator;

— verificarea că compresoarele centrifugale cu diferite diametre ale roților lucrează stabil într-un domeniu larg de debite, la întreruperi ale tensiunii electrice de pînă la 4 s;

— încercarea schemelor de anclanșare automată rapidă AAR de pe partea de 110 kV (realizată pe separatoare) și de pe partea de 6 kV (realizată pe întreruptorul de sector) și verificarea posibilității autopornirii, după reanclanșarea automată rapidă a liniei;

— coordonarea posibilității autopornirii, cu uzinele și sistemele energetice corespunzătoare;

— modificarea în modul corespunzător a schemelor de comandă protecție și semnalizare.

Scanned with OKEN Scanner

Verificarea prin calcul a posibilității autopornirii se poate face analog ca la exemplul precedent.

Curbele de oprire ale agregatului, necesare calculului autopornirii, au fost ridicate experimental și sînt dat în fig. 3.28.

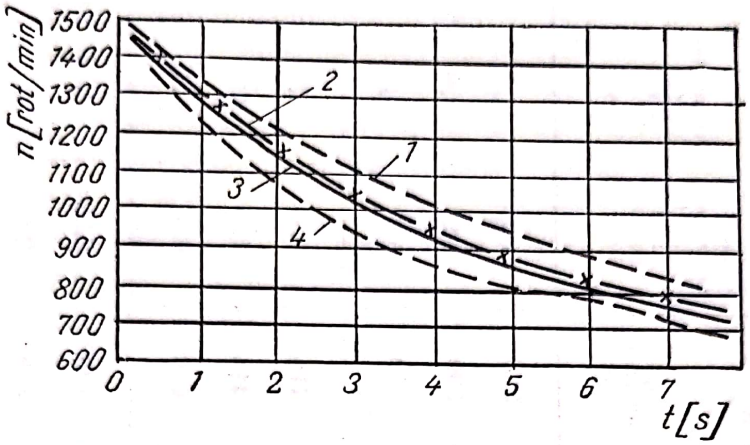


Fig. 3.28. Curbele de oprire a agregatului motor-compresor, pentru următoarele cazuri:

1 — diametrul roții 564 mm, Q=235 m³/min; *2* — același diametru, Q=140 m³/min; *3* — diametrul roții 600 mm, Q=181 m³/min; *4* — același diametru, Q=298 m³/min.

Din fig. 3.28 s-a luat alunecarea pentru durata de la dispariția pînă la revenirea tensiunii, t=4 s.

Efectuînd calculele, s-au obținut următoarele rezultate:

$$\frac{U_a}{U_n}=0{,}675; \quad \frac{M_a}{M_n}=2{,}64\,\frac{M_{ra}}{M_n}.$$

Deci condiția (3.60) a autopornirii este îndeplinită.

De asemenea, s-a determinat durata autopornirii și s-a găsit t=26,2 s, iar pentru creșterea temperaturii în acest interval de timp s-a găsit 30°C la înfășurarea transformatorului și 35°C la înfășurarea motorului.

După ce s-a stabilit prin calcul posibilitatea autopornirii, s-au efectuat încercări experimentale de autopornire, în cursul cărora s-au oscilografiat mărimile importante. Rezultatele obținute sînt date în tabelul 3.2.

Pe baza datelor experimentale s-au construit curbele care reprezintă dependența dintre durata autopornirii pentru unul sau pentru amîndouă agregatele, pentru diferite durate scurse între momentul dispariției tensiunii și momentul revenirii tensiunii, ca urmare a reanclanșării automate rapide (fig. 3.29).

Pe baza rezultatelor obținute au reieșit următoarele concluzii:

— autopornirea agregatelor este posibilă cu condiția ca întreruperea alimentării cu energie electrică să nu depășească trei secunde;

— compresoarele centrifugale funcționează stabil într-un domeniu mare de debite și cu roți diferite, în regim de autopornire pentru întreruperi ale alimentării cu energie electrică timp de 2,4 . . . 6 secunde.

Schema de protecție și semnalizare se poate adapta pentru autopornire, efectuînd doar mici modificări.

Exemplul 3. Se vor da aici după lucrarea [11] rezultatele încercărilor experimentale efectuate asupra unui grup de 5 motoare asincrone dintr-o instalație petrolieră, unde antrenează compresoare. Datele motoarelor sînt: P_n=190 kW; I_n=67 A; U_n=2 kV.

Tabelul 3.2

Rezultatele oscilografierii, la autopornirea agregatelor şi la funcţionarea schemei AAR

Agregatele	Tensiunea pe bare, kV			Curentul statorului, A			Timpul de întrerupere a alimentării cu curent s	Timpul de autopornire s	Scăderea turaţiei înaintea autoporniriii rot/min
	înaintea autoporniriii	în momentul autoporniriii	după autopornire	înaintea autoporniriii	în momentul autoporniriii	după autopornire			
Agregatul avînd roata cu diametrul de 564 mm	6,05	4,6	6,02	410	1 930	390	1,75	1,4	1 180
	6,05	4,53	6,05	390	1 980	390	3,9	3,6	980
	6,05	4,52	6,05	380	2 000	380	5,6	3,9	735
Agregatul avînd roata cu diametrul de 600 mm	6,05	4,5	6,0	415	2 030	415	2,41	2,0	1 110
	6,05	4,45	6,0	415	2 080	415	4,3	4,0	940
	6,05	4,45	6,0	415	2 120	415	6,3	3,5	810
Agregatul avînd roata cu diametrul de 600 mm şi agregatul avînd roata cu diametrul de 564 mm	6,5	3,86	6,45	715*	3 160*	720*	2,22	4,75	1 114 ; 1 080
	6,17	3,82	6,12	808*	3 100*	808*	2,0	5,7	1 145 ; 1 150
	6,17	3,7	6,15	750*	3 120*	750*	3,2	11,8	995 ; 975

*) Curentul total pentru ambele agregate.

Scanned with OKEN Scanner

În tabelul 3.3. sînt dat rezultatele obținute la autopornire.

În fig. 3.30 se dau oscilogramele tensiunii și curentului pentru unul din motoare în timpul autopornirii.

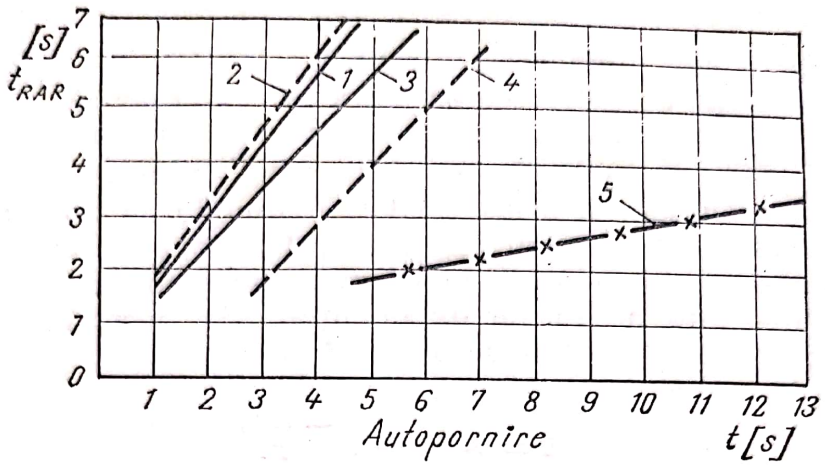


Fig. 3.29. Dependența dintre durata autopornirii și durata de dispariție a tensiunii t_{RAR}:

curbele 1...4 pentru aceleași cazuri ca în fig. 3.27; curba 5 pentru autopornirea a două agregate de la același transformator.

Tabelul 3.3

Curenții la autopornirea motoarelor asincrone

Nr. motorului	1	2	3	4	5
Curentul după autopornire, A	49	61	60	70	61
Durata de întrerupere a tensiunii, s	4,5	4	4	3,8	4
Sarcina motoarelor în regim stabilizat, în fracțiuni din puterea nominală	0,66	0,88	0,87	1,05	0,88

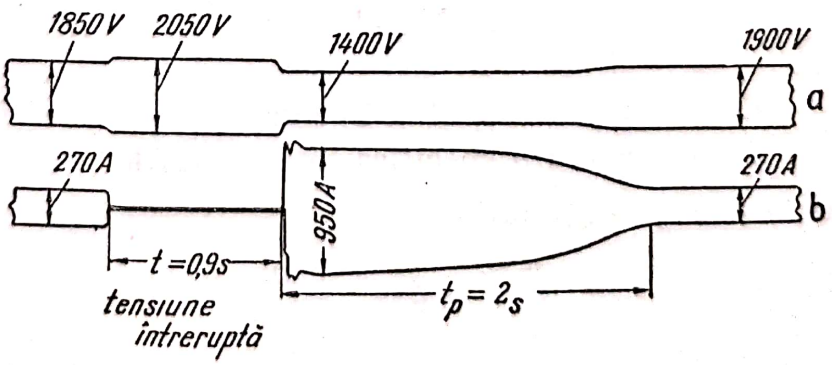


Fig. 3.30. Oscilogramele tensiunii și curentului unui motor asincron la autopornire.

3.8. ÎNCĂLZIREA MOTOARELOR ASINCRONE ÎN REGIM TRANZITORIU ȘI LA SUPRASARCINI DE SCURTĂ DURATĂ

În practică apar numeroase probleme legate de suprasarcini de scurtă durată. Pentru rezolvarea acestora este necesar să se cunoască încălzirea înfășurărilor, adică diferența dintre temperatura înfășurărilor și temperatura mediului ambiant, în funcție de timp și de suprasarcină.

În realitate, încălzirea înfășurărilor în funcție de timp are loc după o lege complicată, dar pentru calcule referitoare la suprasarcini de scurtă durată se poate admite cu o bună aproximație că încălzirea în funcție de timp este de formă exponențială. În acest caz temperatura înfășurării la timpul t se poate scrie sub forma

$$\theta = \theta_1 \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right), \tag{3.69}$$

unde $\theta = \theta_1$, este încălzirea înfășurării în regim staționar, presupunînd că în momentul inițial temperatura corpului coincide cu temperatura mediului înconjurător, adică la $t=0$, $\theta=0$. Încălzirea în regim staționar este

$$\theta_1 = \frac{Q_1}{\alpha A}, \tag{3.70}$$

unde s-a notat: Q_1 — cantitatea de căldură emisă în unitatea de timp de corp, în W;

α — coeficientul de cedare a căldurii prin suprafața corpului, în W/cm²·grd;

A — suprafața de cedare a căldurii, în cm².

Mărimea T se numește constanta de timp a încălzirii sau constanta de timp termică.

În fig. 3.31 este reprezentată variația temperaturii în funcție de timp. Dacă ar fi vorba de un singur corp omogen, atunci constanta termică este

$$T = \frac{cG}{\alpha A}, \tag{3.71}$$

unde s-a notat:

G — masa corpului, în kg;

c — căldura specifică, în J/kg·grd.

Din ecuația (3.69) se obține

$$\frac{d\theta}{dt} = \operatorname{tg}\beta = \frac{\theta_1}{T} = \frac{Q_1}{cG}, \tag{3.72}$$

iar $\operatorname{tg}\beta$ este chiar înclinarea tangentei la curba încălzirii în originea axelor de coordonate.

Scanned with OKEN Scanner

Constanta de timp termică a înfăşurării poate fi determinată simplu prin calcul. Dacă masa înfăşurării este dată în kg, se obţine:

$$G = \frac{\gamma q l}{1\,000}\ [\text{kg}], \tag{3.73}$$

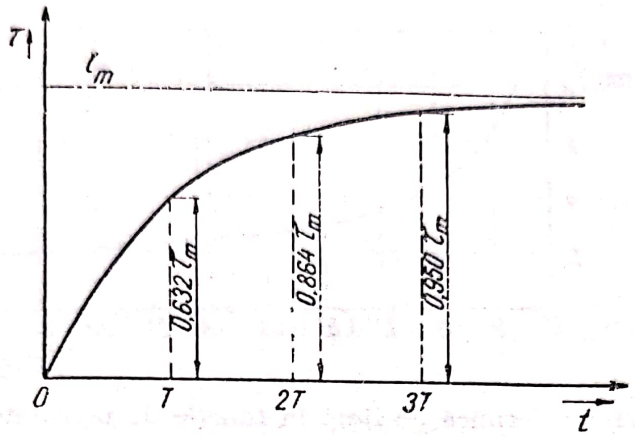


Fig. 3.31. Variaţia încălzirii în funcţie de timp.

unde l este lungimea înfăşurării în m, q aria secţiunii transversale a conductorului în mm², γ masa specifică în kg/dm³, iar pierderile în cupru la valoarea nominală a curentului sînt:

$$Q_n = RI_n^2 = \frac{\rho l k_R}{q} I_n^2\ [\text{W}];\ I_n = J_n q, \tag{3.73, a}$$

unde s-a notat:

ρ — rezistivitatea conductorului înfăşurării;

k_R — coeficientul de refulare a curentului;

J_n — densitatea de curent (valoarea nominală).

Ţinînd seama de ultimele trei expresii, constanta de timp este

$$T = \frac{c\gamma}{1\,000\,\rho k_R} \cdot \frac{\theta_n}{J_n^2}, \tag{3.74}$$

unde s-a notat:

θ_n — încălzirea înfăşurării faţă de mediul de răcire în regim nominal.

Pentru cupru la temperatura de 75°C, se obţine

$\rho = 2{,}2\ \Omega\ \text{mm}^2/\text{m}$; $\gamma = 8{,}9\ \text{kg/dm}^3$;

$c = 390\ \text{J/kg}\cdot\text{grd}$; $k_R = 1{,}05$;

$$T = \frac{390 \cdot 8{,}9 \cdot 45}{1\,000 \cdot 1{,}05} \cdot \frac{\theta n}{J_n^2} = 150\,\frac{\theta n}{J_n^2}. \tag{3.75}$$

În fig. 3.32 este reprezentată curba constantei termice în funcţie de densitatea de curent.

Scanned with OKEN Scanner

La construcția unui motor, densitatea de curent se adoptă din condițiile de răcire. Din acest motiv la motoarele care au ventilație interioară se adoptă o densitate de curent mai mare decît la motoarele care au numai ventilație exterioară. Ca urmare, primele au o constantă ter-

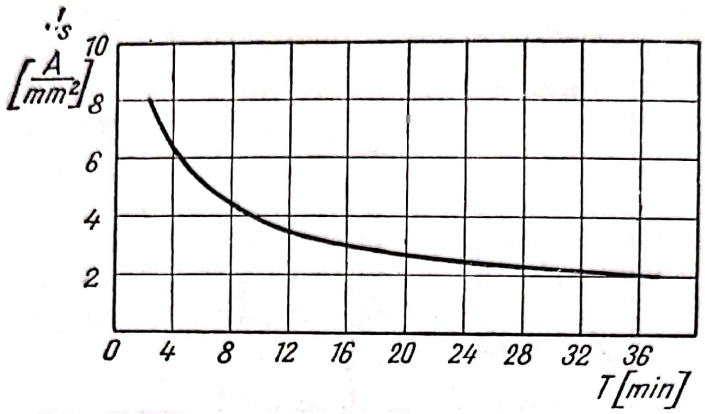


Fig. 3.32. Constanta termică de timp în funcție de densitatea de curent.

mică de timp mai mică. Dacă se cunoaște de exemplu cantitatea de curent și pierderile în înfășurare pentru valoarea nominală a curentului, rezultă masa înfășurării,

$$\frac{G}{Q_n} = \frac{\gamma}{1\,000\,\rho k_R J_n^2} \tag{3.76}$$

și introducînd valoarea rezistivității cuprului pentru temperatura de 75°C se obține masa

$$G = \frac{0.4\ Q_n}{k_R J_n^2}, \tag{3.77}$$

unde Q_n sînt pierderile în W.

3.8.1. Suprasarcini

La calculul încălzirii pentru suprasarcini de scurtă durată se poate neglija transmisia de căldură. Se va considera că înainte de a fi suprasarcinat motorul a funcționat cu o sarcină inițială P_{in}, avînd pierderile în înfășurare Q_{in}. Ulterior se va considera că motorul a fost încărcat brusc, pînă la sarcina P, avînd pierderile corespunzătoare Q.

Diferența dintre căldura dezvoltată la suprasarcină și căldura dezvoltată anterior apariției suprasarcinii determină o creștere a încălzirii înfășurării de la θ_{in} la θ_f, conform relației

$$\frac{Q - Q_{in}}{cG}\, t = \theta_f - \theta_{in}. \tag{3.78}$$

Deci încălzirea înfășurării pe durata suprasarcinii va fi

$$\theta_f = \theta_{in} + \frac{Q - Q_{in}}{cG}\, t. \tag{3.79}$$

Scanned with OKEN Scanner

Din ecuația (3.72) se obține pentru valoarea nominală a sarcinii

$$cG = T\frac{Q_n}{\theta_n}; \tag{3.80}$$

De asemenea, considerînd pierderile și încălzirea înfășurărilor proporționale cu pătratul curentului, se obține

$$Q_{in} = \left(\frac{I_{in}}{I_n}\right)^2 Q_n = k_{in}^2 Q_n. \tag{3.81 a}$$

$$Q = \left(\frac{I}{I_n}\right)^2 Q = k^2 Q_n. \tag{3.81 b}$$

$$\theta_{in} = \left(\frac{I_{in}}{I_n}\right)^2 \theta_n = k_{in}^2 \theta_n. \tag{3.81 c}$$

Avînd în vedere relațiile (3.80) și (3.81 a, b, c), se obține din relația (3.79)

$$\frac{\theta}{\theta_n} = k_{in}^2 + (k^2 - k_{in}^2)\frac{t}{T}, \tag{3.82}$$

iar timpul admis pentru suprasarcină, cînd valoarea încălzirii finale θ este impusă, rezultă

$$\frac{t}{T} = \frac{1}{k^2 - k_{in}^2}\left(\frac{\theta}{\theta_{in}} - k_{in}^2\right). \tag{3.83}$$

Dacă se ține seama și de transmisia de căldură, atunci în locul relațiilor (3.82) și (3.83) se obține

$$\frac{\theta}{\theta_n} = \frac{Q}{Q_n} - \left(\frac{Q}{Q_n} - \frac{Q_{in}}{Q_n}\right)e^{-\frac{t}{T}} = k^2 - (k^2 - k_{in}^2)e^{-\frac{t}{T}} \tag{3.84}$$

și

$$\frac{t}{T} = \ln\frac{Q - Q_{in}}{Q - \frac{Q_n}{n}} = \ln\frac{k^2 - k_{in}^2}{k^2 - \frac{\theta}{\theta_n}}. \tag{3.85}$$

În cele mai multe aplicații pentru suprasarcini de scurtă durată formulele (3.82) și (3.83) sînt satisfăcătoare.

Uneori este necesar să se calculeze încălzirea înfășurării cînd sînt date valoarea suprasarcinii k și durata ei t sau să se calculeze durata admisibilă a suprasarcinii cînd se cunoaște valoarea suprasarcinii, plecînd de la o valoare admisibilă a încălzirii finale.

Pentru aceasta, se înlocuiește expresia (3.75) a constantei de timp în relațiile (3.82) și (3.83) și rezultă

$$\frac{\theta}{\theta_n} = k_{in}^2 + \frac{J_n}{150\ \theta_n}(k^2 - k_{in}^2)t. \tag{3.86}$$

$$t = \frac{150\ \theta_n}{J_n^2} \cdot \frac{\frac{\theta}{\theta_n} - k_{in}^2}{k^2 - k_{in}^2}. \tag{3.87}$$

Dacă sarcina anterioară apariției suprasarcinii era cea nominală, atunci $k_{in} = 1$.

Scanned with OKEN Scanner

3.8.2. Încălzirea la pornire

Dacă mecanismele acționate au piese în rotație cu mase mari sau au momentul static de pornire foarte mare, alegerea puterii nominale a motorului trebuie uneori făcută din condițiile impuse de pornire. Alegerea puterii nominale a motorului poate fi impusă de condițiile de pornire și în cazul unui număr mare de conectări pe oră. Se consideră că acest număr este mare dacă este egal cu 120 conectări pe oră sau mai mare. În acest caz pierderile pe durata pornirii sînt mult mai mari decît în regim stabilizat.

La motoarele de mică importanță se admite încălzirea de aproximativ 100°C, iar la cele a căror funcționare implică o răspundere mai mare se admite încălzirea de aproximativ 35°C, astfel încît să fie asigurată și autopornirea motorului în stare caldă. Pentru a determina durata admisibilă de pornire în funcție de variația admisibilă a încălzirii înfășurării se înlocuiește în ecuația (3.87) $k_m=1$, $\theta-\theta_n=\Delta\theta$; $k=k_{por}$ și se obține

$$t_{por}=\frac{148{,}76}{J_n^2(k_{por}^2-1)}\Delta\theta. \tag{3.88}$$

În această relație se introduc (aproximativ)

$$J_n=4\text{—}5\ \text{A/mm}^2;\quad k_{por}=\frac{I_p}{I_n}=5.$$

Durata pornirii se poate exprima sub forma $t_{por}=t_u T_a$, unde t_u este durata relativă de pornire,

$$t_u=\frac{t}{T_a},$$

iar T_a este constanta mecanică de timp a mecanismului,

$$T_a=\frac{(GD_{mot})^2+(GD_{mec})^2}{364\ P_{mot}\cdot 10^3}, \tag{3.89}$$

unde s-a notat cu GD^2_{mot} — momentul de giratie al motorului, cu GD^2_{mec} — momentul de giratie al mecanismului, în kgf·m², cu P_{mot} — puterea motorului în kW.

Durata relativă de pornire poate fi luată din curbele date în fig. 3.33 și 3.34. Aceste curbe reprezintă alunecarea în funcție de timp $s=f(t)$ pentru motoare care acționează mecanisme cu cuplu rezistent constant.

Exemplul 1. Un motor asincron cu datele $P_n=40$ kW; $U_n=380$ V; $n_n=740$ rot/min, care funcționa la curentul nominal, a fost supraîncărcat cu un curent egal cu de trei ori valoarea nominală timp de două minute. Se cere să se calculeze încălzirea înfășurărilor la sfîrșitul supraîncărcării.

Dacă se consideră că motorul a fost calculat cu o densitate de curent moderată de aproximativ 3...4 A/mm², atunci se obține din fig. 3.32 că are constanta termică de aproximativ 1 000 s.

Scanned with OKEN Scanner

Pentru calculul încălzirii se poate utiliza formula (3.82) sau mai exact formula (3.84) unde se va introduce

$$k_{in}=\frac{I_{in}}{I_n}=1;\quad k=\frac{I}{I_n}=3;\quad t=2\ \text{min}=120\ \text{s}.$$

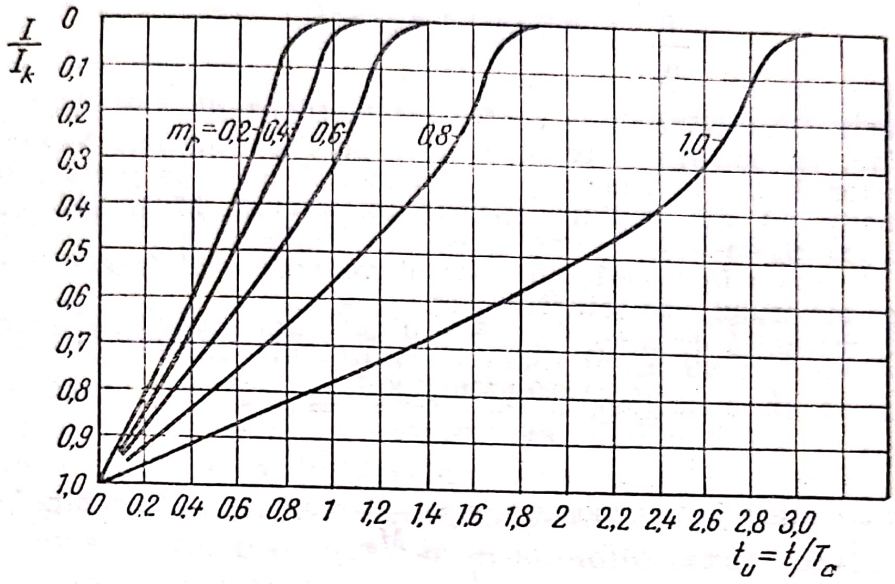


Fig. 3.33. Curba de pornire $s=f(t)$ pentru un motor cu crestături adînci şi mecanism cu cuplu rezistent constant, pentru diferite valori ale cuplului rezistent relativ

$$m_r=\frac{M_{r\ mecanism}}{M_{n\ motor}}.$$

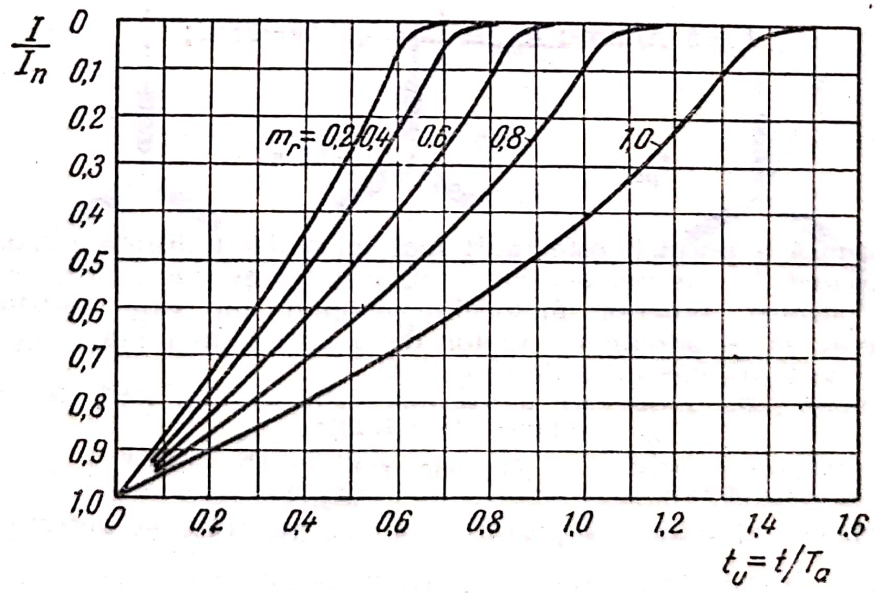


Fig. 3.34. Curba de pornire $s=f(t)$ pentru un motor cu dublă colivie şi mecanism cu cuplu rezistent constant, pentru diferite valori ale cuplului rezistent relativ

$$m_r=\frac{M_{r\ mecanism}}{M_{n\ motor}}.$$

Scanned with OKEN Scanner

Utilizînd formula (3.82), se obține

$$\frac{\theta}{\theta_n}=1+\frac{120}{1\,000}\,(3^2-1)=1{,}96.$$

Utilizînd formula (3.84), se obține

$$\frac{\theta}{\theta_n}=3^2-(3^2-1)e^{-0{,}12}=1{,}9.$$

Exemplul 2. O moară cu bile pentru măcinat cărbuni are momentul de giratie 4 050 kgf/m², iar momentul rezistent este practic constant. Moara este acționată de un motor de 250 kW, iar cuplul rezistent al morii la pornire în gol reprezintă aproximativ 0,4 din cuplul rezistent în sarcină. Momentul de giratie al motorului este 150 kgf·m².

Se cere să se verifice dacă din punctul ve vedere al încălzirii motorului la pornire puterea motorului este satisfăcătoare.

Constanta mecanică de timp a motorului se poate calcula cu relația (3.89)

$$T_a=\frac{(4\,050+150)\,(740)^2}{364\cdot 250\cdot 10^3}=25\ \text{s}.$$

Pentru cuplul rezistent la pornire $m_r=\frac{M_r}{M_n}=0{,}4$, se obține din fig. 3.34

$$t_u=\frac{t}{T_a}=0{,}7.$$

Deci durata pornirii este $t_{por}=0{,}7\cdot 25=17{,}5$ s.

Dacă pornirea s-ar face în plină sarcină, atunci $m_r=1$ și din fig. 3.34 se obține $t_u=1{,}4$, deci durata de pornire va fi atunci $t_{por}=1{,}4\cdot 25=35$ s.

Durata pornirii determinată din încălzirea admisibilă a înfășurării motorului se poate calcula cu formula (3.88), în care se va introduce

$$I_n=5\ \text{A/mm}^2;\ k_{por}=\frac{I_p}{I_n}=5,\quad \Delta\vartheta=35^\circ\text{C};$$

deci

$$t_{por}=\frac{150}{4^2(5^2-1)}\,35=14\ \text{s},$$

adică durata admisă a pornirii este mult mai mică decît durata reală. Rezultă că, deși motorul asigură în sarcină acționarea morii, totuși din condițiile de încălzire admisibilă la pornire, puterea motorului adoptat nu este satisfăcătoare. De aceea este necesar să se adopte un motor de o putere mai mare, de exemplu de 350 kW. Atunci constanta mecanică de timp este

$$T_a=\frac{(4\,050+150)\ (740)^2}{364\cdot 350\cdot 10^3}=18\ \text{s}.$$

Cuplul rezistent al morii, la pornirea în gol, raportat la puterea nominală a motorului, este

$$m_r=0{,}4\,\frac{250}{350}=0{,}29.$$

Pentru această valoare se obține din fig. 3.34 valoarea $t_u=0{,}65$ și durata de pornire este

$$t_{por}=0{,}65\cdot 18=12\ \text{s}.$$

Scanned with OKEN Scanner

Cuplul rezistent în sarcină este

$$m_r = \frac{250}{350} = 0{,}71.$$

Pentru această valoare se obține din fig. 3.34 valoarea $t_u = 0{,}9$ și durata de pornire este

$$t_{por} = 0{,}9 \cdot 18 = 16 \text{ s},$$

deci o durată, deși mai mare, totuși relativ apropiată de durata de pornire admisibilă. Astfel motorul adoptat de 350 kW poate fi considerat acceptabil.

3.9. SINCRONIZAREA MOTOARELOR ASINCRONE

Una din soluțiile industriale relativ simple cunoscute care permite îmbunătățirea factorului de putere, constă în utilizarea motoarelor asincrone sincronizate [28, 29]. Acestea îmbină calitățile de pornire ale motoarelor asincrone cu realizarea unui factor de putere unitar, sau chiar capacitiv, la funcționarea în sarcină, caracteristic motoarelor sincrone.

Studiul și aplicarea acestei metode a arătat că adoptarea ei constituie o bună măsură de tranziție, iar în anumite cazuri poate fi recomandată ca o soluție permanentă.

Motorul asincron-sincronizat este un motor asincron obișnuit, cu rotorul bobinat, a cărui înfășurare rotorică este alimentată după pornire în curent continuu, obținîndu-se un motor sincron.

Alimentarea fazelor rotorului în curent continuu trebuie efectuată conectînd fazele astfel încît numărul polilor rotorici să fie același ca la funcționarea normală în asincron.

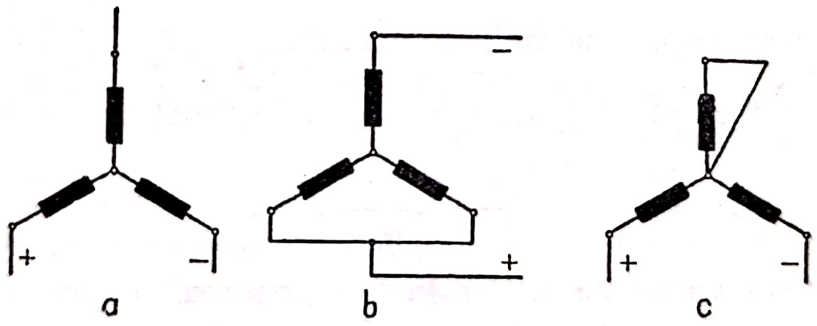


Fig. 3.35. Schema de realizare a excitației unui motor asincron sincronizat:
a — schema de excitație serie; *b* — schema de excitație derivație; *c* — schema de excitație serie cu o fază scurtcircuitată după pornire.

Pentru a realiza excitarea rotorului în curent continuu, se poate folosi una din schemele date în fig. 3.35. Astfel se poate folosi schema serie din fig. 3.35, *a*, sau schema derivație din fig. 3.35, *b*, cunoscută și sub numele de schema Danielsen, sau, în fine, se poate folosi schema din fig. 3.35, *c* care este o schemă serie cu particularitatea că cea de a treia

Scanned with OKEN Scanner

fază se scurtcircuitează după pornire. Pentru a putea realiza schema din fig. 3.35, c este însă necesar să existe patru inele la rotor. De obicei această schemă se foloseşte numai la motoarele asincrone de construcţie specială.

3.9.1. Curentul continuu de excitaţie

Se poate arăta că intensitatea curentului continuu de excitaţie necesar la funcţionarea sincronă la factorul de putere cos $\varphi_s=1$ este

$$i_e=k\frac{P_2}{\sqrt{3}\,\eta\cos\varphi U_2}, \qquad (3.90)$$

$$\cos\varphi_s=1,$$

unde s-a notat: P_2 — puterea utilă a motorului la funcţionarea în regim asincron nominal;

η, cos φ — randamentul şi factorul de putere în acelaşi regim de funcţionare;

U_2 — tensiunea între două inele ale rotorului măsurată cu rotorul deschis şi în repaus;

k — factorul prin care se ţine seama de tipul schemei de excitaţie:

$k=1{,}23$ — pentru schema serie.

$k=1{,}41$ — pentru schema derivaţie.

Modificînd curentul de excitaţie se poate regla factorul de putere în mod convenabil. Nu este însă admisibil să se utilizeze curenţi mai mari decît cei obţinuţi cu relaţia (3.90) pentru a nu încălzi inadmisibil rotorul.

Tensiunea de excitaţie este

$$U_e=R_e i_e, \qquad (3.98)$$

unde R_e este rezistenţa la bornele de excitaţie.

Capacitatea de supraîncărcare a motorului la funcţionarea în regim sincron, pentru factorul de putere cos $\varphi_s=1$ la funcţionarea în regim sincron, este

$$\frac{M_M}{M_n}=\frac{1}{\cos\varphi}, \qquad (3.92)$$

unde cos φ este factorul de putere la funcţionarea în regim asincron nominal.

Ca surse de curent continuu pentru circuitul de excitaţie se utilizează fie generatoare de curent continuu, fie redresoare statice.

Trecerea de la funcţionarea în regim asincron la funcţionarea în regim sincron se realizează prin conectarea înfăşurării rotorului la sursa de curent continuu, utilizînd una din schemele arătate. Această conectare se face cu ajutorul unor comutatoare.

Trecerea de la regimul de funcţionare asincron la regimul de funcţionare sincron se numeşte sincronizare.

Operaţiile de sincronizare se pot face neautomat sau automat utilizînd o schemă de automatizare.

Scanned with OKEN Scanner

3.9.2. Încălzirea înfășurării rotorului

Deoarece la excitarea în curent continuu sînt utilizate schemele din fig. 3.35, fazele nu sînt solicitate termic în mod echilibrat ca la motorul asincron normal. Ca urmare, dacă pierderile totale în înfășurarea rotorului sînt aceleași, atunci încălzirea înfășurării rotorice este ceva mai mare în regimul de funcționare asincron sincronizat decît în regimul de funcționare asincron.

De exemplu, s-a constatat pentru un motor la funcționarea în asincron o încălzire a înfășurării rotorului de 42,6°C, iar la funcționarea în regim asincron sincronizat, o încălzire a înfășurării rotorului de 45,5°C dacă se utilizează schema din fig. 3.35, *a* și 49° dacă se utilizează schema din fig. 3.35, *b*.

Atît din cercetarea fenomenelor cît și din rezultatele expuse mai înainte rezultă că cel mai defavorabil caz din punct de vedere al încălzirii rotorului este folosirea schemei de excitație serie din fig. 3.35, *b*.

Din cele arătate se vede că temperatura rotorului motoarelor asincrone sincronizate nu crește prea mult, astfel că se poate admite din acest punct de vedere sincronizarea motoarelor asincrone care au o oarecare rezervă de temperatură la rotor, dar în cazul mașinilor foarte strîns dimensionate o creștere a temperaturii cu 5—10°C este dăunătoare.

Cercetările efectuate au arătat că trecerea de la un regim de funcționare la altul nu prezintă inconveniente din partea fenomenelor tranzitorii. Sincronizarea are loc cu atît mai ușor cu cît cuplul rezistent este mai mic, iar curentul de excitație mai mare.

În cazul cînd la funcționarea în regim sincronizat apare un cuplu care depășește capacitatea de supraîncărcare a mașinii în regim sincronizat, dar nu pe aceea în regim asincron, motorul iese din sincronism și continuă să funcționeze în asincron pînă cînd supraîncărcarea încetează și motorul reintră în sincronism. Acest regim este foarte defavorabil, deoarece curentul din motor este în acest caz compus din suma dintre curentul continuu de excitație și curentul din regimul de funcționare asincron și ca urmare rotorul se poate încălzi inadmisibil. De aceea este de dorit ca aceste situații să dureze cît mai puțin și să fie pe cît posibil evitate.

În concluzie, utilizarea sincronizării motoarelor asincrone este un mijloc relativ simplu de a dispune de motoare cu caracteristici de pornire deosebit de convenabile, ca ale motoarelor asincrone, iar în funcționare de un factor de putere apropiat sau egal cu unitatea.

Inconvenientul principal al motoarelor asincrone-sincronizate este o capacitate mică de supraîncărcare la funcționarea în regim sincron, de aceea ele trebuie folosite la acele acționări unde nu pot apare suprasarcini.

Exemplu. Se dă un motor asincron cu datele $P_n=100$ kW; $U_2=525$ V; $\cos\varphi=0{,}87$; $\eta=0{,}9$. Se cere să se calculeze curentul de excitație necesar pentru funcționarea în regim sincronizat și de asemenea capacitatea de supraîncărcare în același regim de funcționare.

Scanned with OKEN Scanner

Curentul continuu de excitație în regim sincronizat la $\cos \varphi_s=1$ poate fi calculat cu formula (3.90) și se obține

$$i_e=k\,\frac{100\cdot 10^3}{3\cdot 0{,}9\cdot 0{,}87\cdot 525},$$

pentru $\cos \varphi_s=1$ și rezultă pentru $k=1{,}23$, adică în cazul conexiunii serie, $i_e=300$ A, iar pentru $k=1{,}41$ adică în cazul conexiunii derivație, $i_e=343$ A.

Capacitatea de supraîncărcare în regim sincronizat este dată de formula (3.92),

$$\frac{M_M}{M_n}=\frac{1}{\cos\varphi}=\frac{1}{0{,}87}=1{,}15,$$

deci capacitatea de supraîncărcare în regim sincronizat este mult mai scăzută decît în regim asincron, în schimb factorul de putere este mult îmbunătățit realizînd $\cos \varphi_s=1$

3.10. FUNCȚIONAREA MAȘINII ASINCRONE CA GENERATOR

Mașina asincronă trebuie să absoarbă de la rețea în orice regim de funcționare puterea reactivă necesară pentru magnetizarea ei. Absorbția de putere reactivă (deci absorbția de curent inductiv) corespunde debitării de curent capacitiv, de aceea funcționarea mașinii asincrone în regim de generator se poate realiza numai dacă pe rețeaua la care este conectată există fie generatoare sincrone, fie capacități. Generatoarele vor debita mașinii asincrone curent inductiv. Capacitățile vor permite mașinii asincrone să debiteze un curent capacitiv. În fiecare din aceste două cazuri, în anumite condiții, mașina asincronă se poate autoexcita și poate funcționa ca generator [3, 16, 30].

3.10.1. Funcționarea în gol

Se va considera mașina asincronă antrenată din exterior la turație constantă și cu înfășurarea rotorului scurtcircuitată. Se va considera că în circuitul statorului se află condensatoare, după cum se indică în fig. 3.36, *a* iar rezistența înfășurării statorului este neglijabilă. Se va descrie acum procesul de autoexcitare. O condiție indispensabilă pentru autoexcitarea generatorului asincron este existența magnetismului remanent în oțelul rotorului. Dacă pe rețea există numai condensatoare, atunci fluxul magnetic remanent $\underline{\Phi}_{rem}$ induce în înfășurarea statorului ur sistem trifazat de tensiuni electromotoare $\underline{U}_{erem}$ care vor stabili prin condensatoare curentul $\underline{I}_C$. Diagrama de fazori a fluxului și curentului de fază este reprezentată în fig. 3.36, *b*. Deoarece s-au neglijat rezistențele, tensiunea electromotoare $\underline{U}_{e\,rem}$ stabilește un curent capacitiv $\underline{I}_C$ defazat cu un sfert de perioadă înaintea tensiunii și deci fluxul $\underline{\Phi}_{rem}$ și curentul $\underline{I}_C$ sînt în fază; prin urmare, fluxul produs de $\underline{I}_C$ va întări fluxul $\underline{\Phi}_{rem}$, realizîndu-se astfel procesul de autoexcitare a mașinii. În continuare, procesul se petrece analog ca la generatorul de curent continuu cu excitație derivație, pînă se ajunge la funcționarea stabilizată.

Scanned with OKEN Scanner

Dacă se notează cu C capacitatea rețelei, raportată la o fază a înfășurării statorului și cu $\omega_0 = 2\pi f_0$ pulsația curentului din stator, reactanța rețelei este

$$X_{C0} = \frac{1}{\omega_0 C}. \tag{3.93}$$

Toate reactanțele calculate la frecvența f_0 vor avea indicele zero.

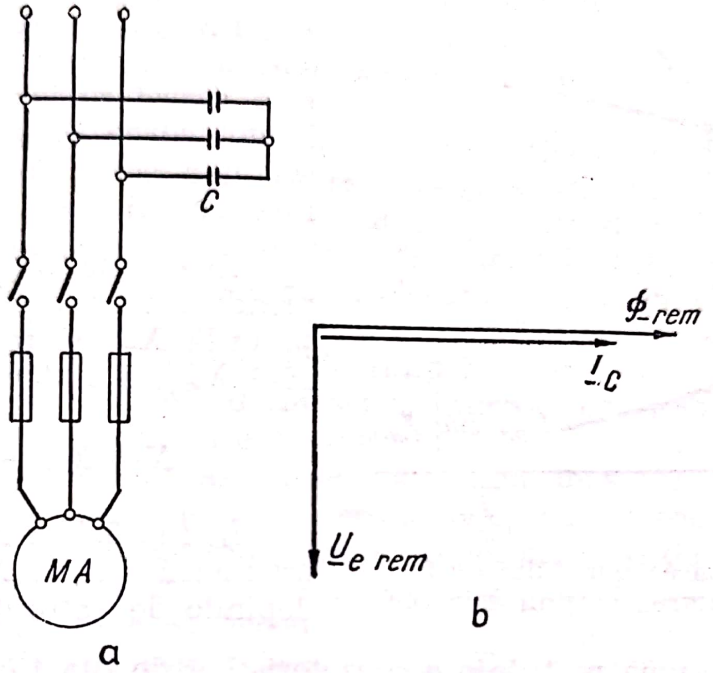


Fig. 3.36. Mașină asincronă conectată la o rețea cu condensatoare:
a — schema electrică; *b* — diagrama de fazori a fluxului și curentului la autoexcitare.

Tensiunea la bornele mașinii este

$$U = X_{C0} I_C. \tag{3.94}$$

La funcționarea în gol curentul din rețea este tocmai curentul de magnetizare, adică

$$I_\mu = I_C.$$

Tensiunea la borne pe fază U poate fi determinată de pe caracteristica de funcționare în gol în funcție de curentul de magnetizare I_μ. Această caracteristică ridicată pentru turația de sincronism și frecvența de rotație f_0, adică la funcționarea în gol ideală sau aproximativ, la funcționarea în gol reală, reprezintă dependența $U_0 = f(I_\mu)$, adică relația

$$U_0 = X_0 I_{C0} = X_0 I_\mu = \omega_0 L I_\mu,$$

unde L este inductanța totală a unei faze a motorului pentru o pulsație ω_0 luată ca bază. Caracteristica $U_0 = f(I_\mu)$ are forma unei curbe de satu-

ra̧tie, deoarece inductanța depinde de curent și, datorită fenomenului de saturație, inductanța scade la creșterea curentului.

Deci la valoarea tensiunii la borne, la care se realizează funcționarea autoexcitată a mașinii asincrone, rezultă din relația

$$U_0 = U_{C0} = X_{C0} I_{C0} = X_{C0} I_\mu = U(I_\mu) \tag{3.95}$$

și este determinată de punctul de intersecție al curbei $U_{C0} = X_{C0} I_\mu$ cu curba $U_0 = f(I_\mu)$. În sistemul de coordonate U, I_μ din fig. 3.37 curba $U_{C0} + X_{C0} I_\mu$ este o dreaptă (curba *1*), iar curba $U_0 = f(I_\mu)$, este caracteristica de funcționare în gol (curba *2*); punctul de intersecție a celor două curbe a fost notat cu *A*.

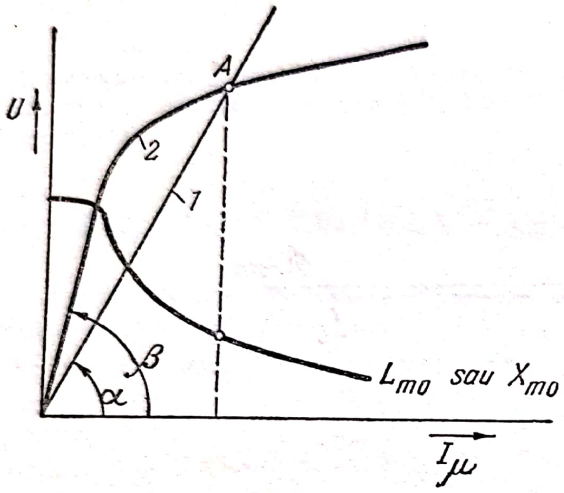


Fig. 3.37. Determinarea punctului de funcționare la autoexcitarea mașinii asincrone.

Reactanța X_0 a mașinii cuprinde două componente: reactanța utilă X_{mo} și reactanța de scăpări $X_{\sigma 10}$ a statorului, adică

$$X_0 = X_{mo} + X_{\sigma 10}. \tag{3.96}$$

În fig. 3.37 s-a reprezentat de asemenea curba $X_{mo} = f(I_\mu)$ care depinde de saturație.

Pentru porțiunea rectilinie a caracteristicii de funcționare în gol, rezultă valoarea nesaturată a reactanței X_0; deci

$$X_0 = X_{no} = X_{m\,no} + X_{\sigma 10}, \tag{3.97}$$

unde $X_{m\,no}$ este reactanța corespunzătoare fluxului magnetic util, adică din oțel, pentru zona nesaturată a caracteristicii, iar $X_{\sigma 10}$ este reactanța corespunzătoare fluxului magnetic de scăpări, adică din aer ($X_{\sigma 10}$ nu depinde în general de saturație).

Pentru ca funcționarea în urma autoexcitației să fie stabilă, este necesar ca să se poată obține punctul de intersecție *A* din fig. 3.37. Dacă dreapta *1* coincide cu porțiunea inferioară a caracteristicii de funcționare în gol, atunci punctul de intersecție *A* este nedeterminat și funcționarea autoexcitată a mașinii nu mai este realizabilă. Condiția de stabilitate este deci chiar condiția ca să existe punctul de intersecție *A*, deci

$$X_{C0} < X_{m\,no} + X_{\sigma 10} \tag{3.98}$$

sau

$$\frac{1}{2\pi f_0 C} < X_{mno} + X_{\sigma 10}, \tag{3.98 a}$$

de unde rezultă

$$C > \frac{1}{2\pi f_0 (X_{mno} + X_{\sigma 10})}. \tag{3.98 b}$$

Scanned with OKEN Scanner

Din relaţia (3.98 a) rezultă capacitatea necesară pentru realizarea autoexcitării maşinii asincrone.

Cînd s-a realizat autoexcitarea unei maşini asincrone, iar la borne nu sînt legate alte impedanţe în afara condensatoarelor pentru autoexcitare, dacă se neglijează toate rezistenţele, maşina funcţionează în gol. Deoarece în această situaţie nu apare nici un cuplu, alunecarea este atunci nulă, iar frecvenţa reţelei este egală cu frecvenţa de antrenare dată de relaţia $f=\frac{pn}{60}$, unde n este turaţia maşinii în rot/min, iar p numărul de perechi de poli ai înfăşurării statorului. Deci, la funcţionarea în gol maşina asincronă în regim de generator se comportă ca o maşină sincronă.

În baza descrierii fenomenului de autoexcitare dată mai înainte, chiar dacă condiţia de stabilitate este satisfăcută, maşina nu se autoexcită totdeauna. Pentru ca autoexcitarea să se producă, este necesar să existe fie un cîmp remanent suficient de intens în rotor, cu acelaşi număr de poli ca statorul, fie o sarcină electrică remanentă a capacităţilor conectate la bornele maşinii. Autoexcitarea poate fi de asemenea provocată alimentînd un scurt interval de timp înfăşurarea statorului de la o reţea trifazată, sau alimentînd un scurt interval de timp două faze ale înfăşurării rotorului cu un curent continuu.

Autoexcitarea maşinii asincrone poate da tensiuni mari pe reţea, dacă generatoarele sincrone sînt deconectate, iar reţeaua la care este conectată înfăşurarea statorului maşinii asincrone este de înaltă tensiune şi deci are o capacitate mare. De aceea este necesar să se prevadă un sistem de protecţie care să deconecteze de la reţea generatoarele asincrone, simultan cu generatoarele sincrone. De asemenea, din motive de protecţia muncii şi de protejare a instalaţiilor, este necesar ca la dispoziţia tensiunii reţelei să se deconecteze şi motoarele asincrone cuplate cu mecanisme care au un moment de inerţie mare, care ar putea determina o prelungire a duratei de oprire, iar în acest interval de timp s-ar putea produce autoexcitarea maşinii asincrone. Astfel de cazuri, deşi practic foarte rare, sînt principial posibile şi se cunosc cazuri de accidente de acest fel.

Dacă impedanţa de sarcină este pur activă, atunci componenta reactivă a curentului care trece pe la bornele maşinii este tocmai curentul I_C şi dacă nu se ia în considerare puterea reactivă corespunzătoare reactanţelor de scăpări, se obţine $I_C=I_\mu$.

3.10.2. **Funcţionarea în sarcină**

Atunci cînd maşina funcţionează ca generator în gol, prin înfăşurarea statorică trece curentul de magnetizare, dar prin înfăşurarea rotorică nu trece nici un curent, deoarece alunecarea este nulă. Cînd maşina funcţionează ca generator în sarcină, prin înfăşurarea rotorică trece un curent, deoarece alunecarea este diferită de zero şi negativă. După cum rezultă din schema echivalentă a maşinii asincrone, dacă alunecarea s a maşinii

Scanned with OKEN Scanner

este negativă, atunci mărimea $\frac{R_2'}{s} I_2'^2$ este de asemenea negativă, adică puterea activă absorbită este negativă, sau ceea ce este același lucru are loc o debitare de putere activă.

Alunecarea s este dată de relația cunoscută

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1},$$

unde n_1 este turația cîmpului învîrtitor al statorului față de stator, iar n este turația rotorului. Astfel, față de funcționarea în gol cu turația n, la funcționarea în sarcină cu turația de antrenare a mașinii n constantă, turația cîmpului învîrtitor statoric $n_1 = \frac{1}{1-s} n$ trebuie să scadă deoarece $s < 0$. Deci frecvența curentului statoric scade la creșterea sarcinii active proporțional cu $\frac{1}{1-s}$. De asemenea, în expresia reactanțelor X și X_C se micșorează frecvența, deci $X = 2\pi f L$ scade, iar $X_C = \frac{1}{2\pi f C}$ crește. Ca urmare a micșorării frecvenței, în fig. 3.37 curba *1* dată de relația $\frac{U}{I_C} = X_C$ se apropie de verticală, iar curba *2* dată de relația $\frac{U}{I_\mu} = X_0$ se apropie de orizontală. Deci punctul A coboară și prin urmare tensiunea electromotoare la care se autoexcită mașina scade cînd crește s, iar la o anumită valoare a alunecării, tensiunea dispare brusc și autoexcitarea nu mai este posibilă.

3.10.3. Funcționarea generatorului asincron cu condensator și conductanță în paralel

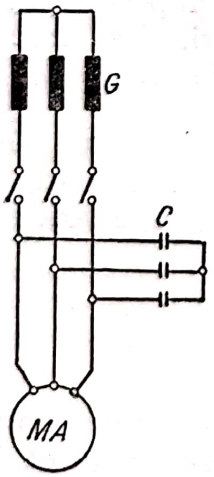


Fig. 3.38. Generator asincron cu capacitate și conductanță în paralel.

Se va considera funcționarea generatorului asincron prevăzut cu condensatoare pentru asigurarea autoexcitării și care debitează pe o conductanță G conectată la borne în paralel cu condensatoarele.

Schema principială de montaj a mașinii este reprezentată în fig. 3.38. Pentru a studia funcționarea mașinii se va utiliza schema echivalentă a mașinii asincrone și se va conecta la bornele schemei capacitatea și conductanța. Pentru simplificarea calculelor în locul schemei echivalente cunoscute a mașinii asincrone, se va considera o schemă care în locul reactanței de scăpări primare conține reactanța de scăpări totală, primară și secundară și nu mai conține separat reactanța de scăpări secundară. Aproximația făcută prin modificările arătate, este cu totul acceptabilă. Se obține schema echivalentă din fig 3.39.

Scanned with OKEN Scanner

Se va presupune turația rotorului n dată și prin urmare turația cîmpului magnetic învîrtitor statoric este, după cum s-a arătat,

$$n_1 = \frac{60f}{p} = \frac{1}{1-s}\, n. \qquad (3.99\ a)$$

Dacă frecvența de rotație este dată

$$f_0 = \frac{pn}{60}, \qquad (3.99\ b)$$

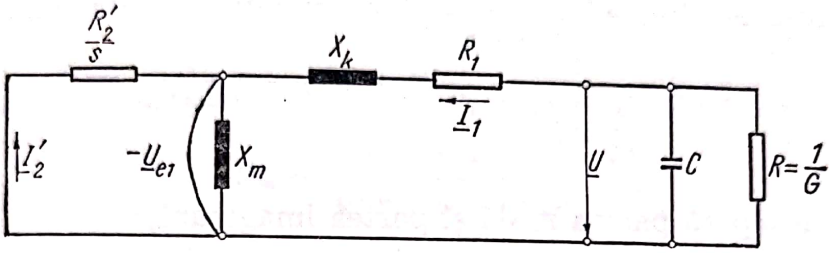


Fig. 3.39. Schema echivalentă pentru calculul funcționării unui generator asincron cu condensator, care debitează pe o conductanță.

atunci frecvența curentului statoric este

$$f = \frac{f_0}{1-s}, \qquad (3.99\ c)$$

iar pulsația

$$\omega = \frac{\omega_0}{1-s}.$$

În funcție de cazul care se examinează, se vor efectua calculele fie plecînd de la pulsația f_0 corespunzătoare turației rotorului, fie de la pulsația reală $f = \frac{f_0}{1-s}$, unde s este alunecarea care în regim de generator asincron este negativă. În ultimul caz, calculele sînt mult mai simple, dar de cele mai multe ori mărimea dată este f_0.

Parametrii mașinii definiți pentru frecvența f se vor nota în mod obișnuit, iar parametrii definiți pentru frecvența f_0 se vor nota cu indicele zero.

Pentru simplificarea calculelor se notează

$$B_m = \frac{1}{X_m} = \frac{1-s}{X_{m0}} = (1-s)B_{m0}; \qquad (3.100\ a)$$

$$B_C = \frac{1}{X_C} = \omega C = \frac{B_{C0}}{1-s}; \qquad (3.100\ b)$$

$$X_k = \frac{X_{k0}}{1-s}. \qquad (3.100\ c)$$

Scanned with OKEN Scanner

Ecuațiile circuitelor din fig. 3.39 alimentate la borne cu tensiunea $\underline{U}$ sînt:

$$\underline{U}=\frac{1}{\frac{s}{R_2'}+\mathrm{j}B_m}\,\underline{I}_1+(R_1+\mathrm{j}X_k)\underline{I}_1; \tag{3.101 a}$$

$$\underline{U}=-\frac{1}{G+\mathrm{j}B_C}\,\underline{I}_1. \tag{3.101 b}$$

Eliminînd tensiunea $\underline{U}$, rezultă după efectuarea calculelor

$$-\frac{1}{\frac{s}{R_2'}+\mathrm{j}B_m}-(R_1+\mathrm{j}X_k)-\frac{1}{G+\mathrm{j}B_C}=0 \tag{3.102}$$

și după ce se separă partea reală și partea imaginară,

$$\frac{-\frac{s}{R_2'}}{\left(\frac{s}{R_2'}\right)^2+B_m^2}=R_1+\frac{G}{A^2}, \tag{3.103 a}$$

$$\frac{B_m}{\left(\frac{s}{R_2'}\right)+B_m^2}=-X_k+\frac{B_C}{A^2}, \tag{3.103 b}$$

$$A^2=G^2+B_C^2. \tag{3.103 c}$$

În general, în rezolvarea sistemului de ecuații (3.103) prezintă interes două cazuri.

Dacă se pleacă de la frecvența f, atunci mărimile X_k și B_C sînt cunoscute și sistemul de ecuații (3.103) dă imediat alunecarea s și susceptanța B_m, fixînd deci totodată starea de saturație. Astfel regimul de funcționare este complet determinat.

Dacă însă este dată frecvența de rotație f_0, atunci mărimile X_k, B_m, B_C trebuie înlocuite cu expresiile lor în funcție de alunecarea s, iar rezolvarea sistemului de ecuații devine mult mai complicată. Soluția poate fi obținută prin aproximări succesive: se adoptă inițial pentru alunecare o valoare considerată mai apropiată de valoarea reală și se obțin anumite valori pentru X_k, B_m. Rezolvînd sistemul de ecuații cu aceste valori, se obține B_m și s. Dacă valoarea obținută pentru s diferă mult de valoarea inițială se introduce ultima valoare găsită pentru s și se repetă calculele. Se procedează astfel pînă cînd prin rezolvarea sistemului de ecuații se obține pentru alunecare o valoare apropiată de valoarea de la care s-a plecat.

Pentru a simplifica rezolvarea sistemului de ecuații (3.103) se poate proceda după cum urmează.

Scanned with OKEN Scanner

Împărțind membru cu membru ecuațiile (3.103 a) și (3.103 b), se obține

$$-\frac{s}{R_2' B_m} = \frac{G+A^2R_1}{B_C-A^2X_k} = \lambda; \tag{3.104}$$

deci

$$B_m = \frac{\lambda A^2}{(1+\lambda^2)(A^2R_1+G)}, \tag{3.105 a}$$

și

$$-\frac{s}{R_2'} = \frac{\lambda^2 A^2}{(1+\lambda^2)(A^2R_1+G)}. \tag{3.105 b}$$

Dacă rezistența înfășurării primare R_1 este neglijabilă, se obține

$$B_m = \frac{(B_C-A^2X_k)\,A^2}{G^2+(B_C-A^2X_k)^2} \tag{3.106 a}$$

și

$$-\frac{s}{R_2'} = \frac{A^2G}{G^2+(B_C-A^2X_k)^2}, \tag{3.106 b}$$

iar acest sistem de ecuații poate fi rezolvat mai ușor pentru fiecare din cele două cazuri amintite referitor la sistemul de ecuații (3.103).

După ce s-a obținut B_m, rezultă $X_m = \frac{1}{B_m}$ și deci, recalculat la frecvența de rotație, X_{m0}.

Din discuția sistemului de ecuații (3.103) se pot stabili posibilitățile de funcționare ale mașinii asincrone ca generator autoexcitat.

În primul rînd, X_{m0} trebuie să fie cel mult egal cu valoarea maximă nesaturată a lui X_m notată X_{mn}. În cazul limită cînd conductanța G este nulă, ceea ce face ca alunecarea să fie de asemenea nulă $s=0$, se obține

$$\frac{B_{C0}}{1-B_{C0}X_{k0}} \geqslant \frac{1}{X_{mn0}}$$

și rezultă

$$B_{C0}(X_{k0}+X_{mn0}) \geqslant 1$$

sau

$$\omega_0 C(X_k+X_{m0}) \geqslant 1, \tag{3.107}$$

relație analogă cu relația (3.98, b).

De asemenea, deoarece B_m trebuie să fie pozitiv, rezultă

$$B_C - A^2X_k > 0,$$

sau

$$B_C - (G^2+B_C^2)X_k > 0;$$

deci

$$G < \sqrt{\frac{B_C}{X_k}(1-B_CX_k)}. \tag{3.108}$$

Deoarece este necesar ca G să fie un număr real, trebuie să existe inegalitatea

$$1-B_C X_k > 0$$

sau, deoarece $\omega < \omega_0$, urmează că

$$\omega_0 C X_k < 1. \tag{3.109}$$

Valoarea limită a capacității date de relația (3.109) corespunde capacității pentru care se realizează rezonanța cu inductanța totală de scăpări.

Deci capacitatea necesară pe fază, pentru a realiza autoexcitarea mașinii asincrone, trebuie să fie cuprinsă între o limită inferioară dată de relația (3.107) și o limită superioară dată de relația (3.109).

După ce se cunoaște valoarea lui B_m sau X_m obținute prin rezolvarea sistemului de ecuații (3.106), se recalculează cu ajutorul formulei (3.100 a) reactanța la frecvența de rotație f_0 și se obține

$$X_0 = \omega_0 L_0 = (X_{m0} + X_{\sigma 10}) = \frac{1-s}{B_m}.$$

Cunoscînd această valoare a lui X_0, se obține X_{m0} și deci din fig. 3.37, de pe curba $X_{m0} = f(I_\mu)$, curentul I_μ și tensiunea U_0 care corespund funcționării în gol. Dar la funcționarea în gol $U_{e10} \approx U_0$. Recalculînd tensiunea electromotoare la frecvența f, se obține

$$U_{e1} = \frac{U_{e10}}{1-s} \approx \frac{U_o}{1-s},$$

La construirea curbei $X_{m0} = f(I_\mu)$ trebuie să se aibă în vedere că X_{m0} este reacțanța circuitului magnetizant și nu reactanța totală. Deci la funcționarea în gol ideală cu frecvența de rotație f_0, dacă se neglijează rezistența înfășurării statorului R_1, se poate scrie

$$X_{m0} = \frac{U}{I_\mu} - X_{\sigma 10},$$

Dacă curba $X_m = f(I_\mu)$ este construită pentru o altă frecvență și nu pentru frecvența de rotație f_0, atunci este necesar să se efectueze recalcularea corespunzătoare a parametrilor.

Scriind ecuațiile circuitului din fig. 3.39 rezultă relația dintre $\underline{U}$ și $\underline{U}_{e1}$,

$$\underline{U} = \left[1-(R_1 + jX_k)\left(-\frac{s}{R_2'} + jB_m\right)\right]\underline{U}_{e1} =$$

$$= \left[\left(1 + R_1\frac{s}{R_2'} + X_k B_m\right) - j\left(-\frac{s}{R_2'}X_k + B_m R_1\right)\right]\underline{U}_{e1},$$

iar valoarea eficace a tensiunii la bornele generatorului asincron este

$$U = U_{e1}\sqrt{\left(1 + R_1\frac{s}{R_2'} + X_k B_m\right)^2 + \left(-\frac{s}{R_2'}X_k + B_m R_1\right)^2}. \tag{3.110}$$

Scanned with OKEN Scanner

Dacă generatorul asincron este conectat la rețea printr-un transformator coborîtor, poate fi uneori convenabil ca bateria de condensatoare să fie montată pe partea de înaltă tensiune, deoarece atunci sînt necesare condensatoare de capacități mai mici și de tensiuni mai ridicate, la curenți mici, care se pot realiza mai ușor decît condensatoarele de capacități mari la tensiuni joase și curenți mari. Valoarea capacității se calculează din condiția ca puterea reactivă să fie aceeași indiferent dacă condensatoarele sînt montate în circuitul primar sau în circuitul secundar.

Expresia capacității introduse în circuitul primar, în cazul de față pe partea de înaltă tensiune este

$$C_i = C\left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2$$

În acest caz trebuie să se țină seama la calculul capacității și de reactanța de scăpări a transformatorului care va fi adunată la reactanța de scăpări a motorului.

3.10.4. Schema de montaj a generatorului asincron

Schema de montaj a mașinii asincrone ca generator autoexcitat care debitează pe o rețea izolată se poate vedea în fig. 3.40.

Cu cît sarcina inductivă pe care debitează generatorul asincron este mai mare, cu atît capacitatea conectată în paralel cu mașina trebuie să fie mai mare pentru a se realiza puterea reactivă necesară mașinii. Dar

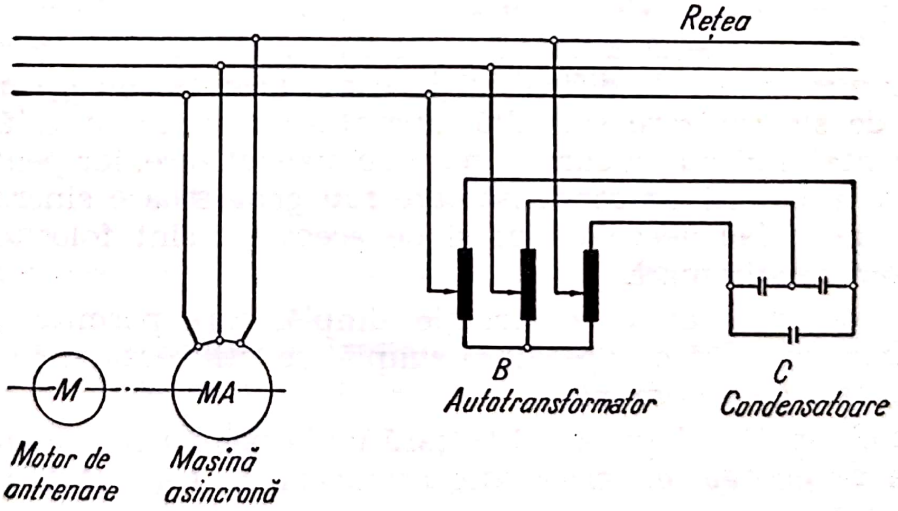


Fig. 3.40. Schema practică de montaj a mașinii asincrone ca generator autoexcitat.

odată cu creșterea capacității, crește și tensiunea de funcționare în gol și totodată solicitarea magnetică a mașinii. Pentru a realiza o tensiune aproximativ constantă, la diferite sarcini, capacitatea se reglează în funcție de sarcină.

La funcționarea în gol pot apărea solicitări magnetice mari și anume, datorită tensiunilor ridicate, apar inducții magnetice mari. De aceea este

Scanned with OKEN Scanner

necesar ca aceste solicitări să fie limitate. Această limitare se poate realiza conectînd în paralel cu mașina o bobină cu miez de oțel foarte saturat. În cazul din fig. 3.40 bobina este realizată sub forma unui autotransformator. Acest autotransformator servește totodată la ridicarea tensiunii condensatorului, ceea ce permite să se utilizeze condensatoare de capacități cît mai mici.

3.10.5. Concluzii

Din cercetările efectuate asupra mașinilor asincrone la funcționarea ca generator s-au dedus următoarele concluzii:

generatorul asincron cu autoexcitație poate funcționa stabil, indiferent dacă sarcina este activă sau inductivă;

la funcționarea în sarcină la turație constantă frecvența se poate varia prin variația capacității conectate în paralel;

dacă receptoarele de pe rețea sînt motoare asincrone, tensiunea generatorului asincron variază aproximativ proporțional cu frecvența;

conectarea receptoarelor se poate face atît înainte cît și după autoexcitarea mașinii asincrone. În toate instalațiile cu generatoare asincrone cu autoexcitație, partea cea mai voluminoasă și cu prețul de cost cel mai ridicat este bateria de condensatoare. Este posibil să se realizeze alimentarea unei rețele izolate cu un generator asincron antrenat cu un motor primar oarecare (turbină hidraulică, motor cu ardere internă) și prevăzut cu o baterie de condensatoare.

Față de generatoarele sincrone, generatoarele asincrone prezintă avantajul că nu necesită alimentare în curent continuu pentru excitație și nu apar nici un fel de dificultăți la conectarea la rețea, care să ceară dispozitiv de sincronizare sau altă aparatură mai complicată. Prezintă însă dezavantajul că au un curent mare de magnetizare, iar pentru magnetizare necesită baterii de condensatoare sau generatoare sincrone. Aceste inconveniente le fac neeconomice și de aceea nu sînt folosite, mai ales pentru puteri relativ mari.

Totuși, deoarece au o construcție simplă, care permite o siguranță mare în funcționare și o exploatare simplă, se utilizează și în prezent în diferite centrale de putere mică.

Există cîteva instalații la noi în țară unde pentru consumatori izolați, producerea de energie electrică este asigurată de generatoare asincrone.

În alte țări există de asemenea instalații similare. De exemplu, în Franța treizeci de microcentrale construite pe căderi de apă mici, de aproximativ 2 m înălțime, sînt echipate cu grupuri electrohidraulice, denumite de tip bulb, instalate fie în sifon, fie în cameră deschisă, iar generatoarele grupurilor sînt asincrone. Aceste construcții de microcentrale au fost realizate de Électricité de France și sînt relativ recente.

Exemplu. Se consideră o mașină asincronă trifazată cu datele: $P_n=20$ kW, $U_n=380/220$ V; $I_n=40$ A; $p=3$; $f=50$ Hz.

Scanned with OKEN Scanner

Parametrii mașinii la frecvența de 50 Hz sînt:

$$X_{1\sigma}=0{,}5\,\Omega;\quad X_{2\sigma}=0{,}7\,\Omega;\quad X_k=1{,}2\,\Omega;\quad X_{mn}+X_{\sigma 1}=24{,}1\,\Omega;\quad R_2'=0{,}144\,\Omega.$$

Mașina este conectată la rețea printr-un transformator ridicător avînd $U_1/U_2=400/30\,000$ V și reactanța totală de scăpări raportată la înfășurarea de joasă tensiune $X_\sigma=0{,}35\,\Omega$. Se cere să se calculeze funcționarea în regim de generator asincron.

Funcționarea ca generator asincron în gol. Din relația (3.98) rezultă că valoarea capacității necesare pe fază, pentru a realiza autoexcitația este

$$C>\frac{1}{2\pi f\,(X_{mn}+X_{\sigma 1})}=\frac{1}{314\cdot 24{,}1}=132\cdot 10^{-6}\,\text{F}=132\,\mu\text{F}.$$

Dacă generatorul asincron este conectat printr-un transformator ridicător, iar condensatoarele se montează pe partea de înaltă tensiune, este necesar să se recalculeze capacitatea luînd în considerare și reactanța de scăpări a transformatorului. Se obține $X=24{,}45\ \Omega$ și deci

$$C>\frac{1}{314\cdot 24{,}45}=130\cdot 10^{-6}\ \text{F sau}\ C>130\,\mu\text{F}.$$

Deoarece capacitatea se introduce pe partea de înaltă tensiune, rezultă că este necesar să aibă valoarea

$$C_i>130\cdot\left(\frac{400}{30\,000}\right)^2\ \text{deci}\ C_i>0{,}0231\,\mu\text{F}.$$

Trebuie menționat că o linie aeriană, trifazată cu lungimea de 3...4 km și cu capacitatea specifică de 0,006...0,008 μF/km realizează o capacitate de această valoare.

Funcționarea ca generator asincron în sarcină. Se va considera frecvența de rotație $f_0=50$ Hz. Limita superioară a capacității este dată de relația (3.109 *b*), unde în locul lui X_k, pentru a ține seama și de transformator, se va introduce suma dintre reactanța totală de scăpări a mașinii și transformatorului, adică 1,55 Ω la frecvența de 50 Hz. Cu ajutorul relației (3.109) se obține

$$C<\frac{1}{314\cdot 1{,}55}\ \text{deci}\ C<2\,050\,\mu\text{F}.$$

Limita inferioară a capacității a fost calculată mai înainte și s-a obținut $C>130\ \mu$F.

Se vor calcula tensiunile și curenții în regimul de funcționare ca generator asincron, care debitează pe o conductanță, în cazul cînd datele sînt următoarele: $C=195\,\mu$F; $B_{C0}=G=\frac{1}{R}=0{,}061\,\Omega^{-1}$. Se presupune dată frecvența de rotație $f_0=50$ Hz. Este necesar să se rezolve sistemul de ecuații (3.106), ceea ce se face prin aproximări succesive. După o primă aproximare s-a obținut $s=-0{,}01$ și atunci relațiile (3.100 b și c) dau

$$B_C=\frac{0{,}061}{1{,}01}=0{,}0604\,\Omega^{-1},$$

$$X_k=\frac{1{,}55}{1{,}01}=1{,}533\,\Omega.$$

Relația (3.103 c) dă

$$A^2=(0{,}061)^2+(0{,}0604)^2=73{,}7\cdot 10^{-4}$$

Scanned with OKEN Scanner

și deci

$$B_C - A^2 X_k = 0{,}0604 - 73{,}7 \cdot 10^{-4} \cdot 1{,}533 = 0{,}0491.$$

Din relațiile (3.106) se obține

$$B_m = \frac{0{,}0491 \cdot 73{,}7 \cdot 10^{-4}}{(0{,}061)^2 + (0{,}0491)^2} = 0{,}059,$$

$$-\frac{s}{R_2'} = \frac{73{,}7 \cdot 10^{-4} \cdot 0{,}061}{(0{,}061)^2 + (0{,}0491)^2} = 0{,}0733.$$

Deci,

$$-s = 0{,}0733 \quad R_2' = 0{,}0733 \cdot 0{,}144 = 0{,}0106,$$

$$B_{m0} = \frac{0{,}059}{1{,}011} = 0{,}0584$$

și

$$X_{m0} = \frac{1}{0{,}0584} = 17{,}12\ \Omega.$$

Să presupunem că de pe curba din fig. 3.37 se obține pentru această valoare a lui X_{m0} tensiunea $U \approx U_{e1} = 264$ V. Atunci, cu ajutorul expresiei (3.110) se obține tensiunea la bornele generatorului asincron,

$$U = \frac{264}{1{,}011} \sqrt{(1 + 1{,}533 \cdot 0{,}059)^2 + (0{,}0733 \cdot 1{,}535)^2} = 286\ \text{V}.$$

Curentul debitat de generatorul asincron este compus din curentul debitat pe conducta de sarcină,

$$I_G = GU = 0{,}061 \cdot 286 = 17{,}4\ \text{A},$$

și din curentul debitat pe capacitate,

$$I_C = B_C U = \omega C U = 0{,}0604 \cdot 286 = 17{,}3\ \text{A};$$

deci, curentul total debitat de generatorul asincron este

$$I = \sqrt{I_G^2 + I_C^2} + \sqrt{(17{,}4)^2 + (17{,}3)^2} = 24{,}5\ \text{A}.$$

3.11. FUNCȚIONAREA MOTOARELOR ASINCRONE ALIMENTATE DE CONVERTOARE

Prin combinația convertor—motor asincron cu colivie se realizează un motor cu proprietăți deosebit de favorabile: reglare de turație în limite largi, pornire cu cuplu maxim sau cu intensitatea curentului limitată, durată scurtă de pornire, posibilitatea de utilizare în atmosferă agresivă.

Aceste instalații au însă inconvenientul unui preț de cost ridicat din cauza convertorului și a unui grad mare de complexitate determinat de sistemul de comandă a tiristoarelor.

Deoarece tensiunea convertorului nu este sinusoidală, curenții din înfășurarea motorului nu sînt nici ei sinusoidali. Față de funcționarea la

Scanned with OKEN Scanner

tensiune sinusoidală, efectul armonicilor superioare ale tensiunii se manifestă prin: creşterea temperaturii şi încălzirii, micşorarea randamentului, a factorului de putere, creşterea cuplurilor parazite şi a zgomotului [31, 32, 33, 34, 35, 36, 37].

Reducerea acestor inconveniente este posibilă prin realizarea convertorului astfel, încît să dea o curbă cît mai apropiată de sinusoidă, dar această soluţie impune modificări constructive ale convertorului, care măresc simţitor costul instalaţiei.

Cercetările teoretice şi experimentale au arătat că înrăutăţirea formei curbei cuplului apare totdeauna cînd motoarele asincrone sînt alimentate de convertoare, dar nu este importantă.

Prezintă interes în special stabilirea creşterii pierderilor şi încălzirii, la alimentarea motorului de la convertor, pentru a se aprecia dacă funcţionarea în aceste condiţii este admisibilă.

Dacă tensiunea de alimentare nu este sinusoidală, atunci se descompune într-o serie de armonici de timp. Astfel. motorul asincron real poate fi considerat ca fiind constituit dintr-o serie de motoare fictive cuplate pe acelaşi arbore. Aceste motoare fictive se învîrtesc toate cu aceeaşi turaţie şi sînt alimentate la tensiuni de valoare eficace diferită: U_1, U_3, U_5, ..., U_μ, de frecvenţă diferită f_1, f_3, f_5, ..., $f_\mu = \mu f_1$, unde μ reprezintă ordinul armonicii.

Armonicile de tensiune U_1, U_3, U_5, ..., U_μ produc armonicile respective de curent I_1, I_3, I_5, ..., I_μ. Fiecare armonică a curentului produce o tensiune magnetică care poate fi descompusă într-o armonică fundamentală şi în armonici superioare de spaţiu. Se vor considera numai cele de spaţiu. Atunci armonica de timp a curentului I_μ produce o tensiune magnetică învîrtitoare cu turaţia μn_1. Alunecarea rotorului faţă de această undă a cîmpului magnetic este

$$s_\mu = \frac{\mu n_1 \mp n}{\mu n_1} = 1 \mp (1-s)\frac{1}{\mu},$$

iar la funcţionarea nominală, cînd $s \ll 1$, se obţine

$$s_\mu = 1 \mp \frac{1}{\mu},$$

unde semnul superior corespunde armonicilor care se rotesc în acelaşi sens ca şi armonica fundamentală, iar semnul inferior corespunde armonicilor care se rotesc în sens contrar.

Fiecărei armonici a tensiunii îi corespunde o schemă echivalentă a motorului asincron. Schemele echivalente ale seriei de motoare fictive diferă numai prin valoarea parametrilor. Dacă nu există fenomenul de refulare a curentului, atunci legătura dintre parametrii motorului fictiv, corespunzător armonicii fundamentale şi motorul fictiv corespunzător armonicii μ este dată de relaţiile:

$$R_{1\mu} = R_1; \quad R'_{2\mu} = R'_2; \quad X_{\sigma 1\mu} = \mu X_{\sigma 1};$$

$$X'_{\sigma 2\mu} = \mu X'_{\sigma 2}; \quad R_{m\mu} \approx 0; \quad X_{m\mu} = \mu X_m.$$

Scanned with OKEN Scanner

La funcționarea în regim nominal $s \ll 1$ și atunci, dacă se neglijează influența impedanței circuitului magnetizant pentru armonica μ, adică $Z_{m\mu}$, se obține că expresia factorului de putere al mașinii fictive de ordinul μ este

$$\cos \varphi_\mu = \frac{R_1 + \frac{\mu R'_2}{\mu \mp 1}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{\mu R'_2}{\mu \mp 1}\right)^2 + \mu^2 (X_{\sigma 1} + X'_{\sigma 2})^2}}.$$

Rezultă că factorul de putere pentru armonica de ordinul μ este foarte mic, deci curenții I_μ sînt aproape pur inductivi.

Efectul existenței armonicilor superioare de tensiune este echivalent cu o mărime a reactanțelor de scăpări, ceea ce are ca rezultat micșorarea factorului de putere, a randamentului, a cuplului maxim.

Totuși influența armonicilor de timp din curba tensiunii la borne se manifestă relativ slab, chiar pentru valori relativ mari ale amplitudinii armonicilor. De exemplu, dacă curba tensiunii la borne conține armonicile de ordinul 5 și 7, iar armonica de ordinul 5 reprezintă 20% din armonica fundamentală și armonica de ordinul 7 reprezintă 15% din armonica fundamentală, valoarea maximă a factorului de putere $\cos \varphi$ scade cu aproximativ 2,6% față de valoarea maximă a factorului de putere $\cos \varphi$ pentru tensiune sinusoidală la borne.

Pierderile în conductoarele înfășurării primare și secundare sînt:

$$\sum_\mu P_{\text{Cu } 1\mu} = m_1 \sum_\mu R_{1\mu} I^2_\mu;$$

$$\sum_\mu P_{\text{Cu } 2\mu} = m_1 \sum_\mu R'_{2\mu} I^2_\mu,$$

unde m_1 este numărul de faze, adică $m_1 = 3$.

Pierderile totale de oțel produse prin histerezis și curenți turbionari depind aproximativ de pătratul inducției magnetice și de puterea 1,3 a frecvenței. Dacă se ține seama că inducția magnetică variază, aproximativ proporțional cu tensiunea și invers proporțional cu frecvența, se obține

$$\sum_\mu P_{\text{Fe } 1} = P_{\text{Fe } 1} \sum_\mu \left(\frac{U_\mu}{U_1}\right)^2 \frac{1}{\mu^{0,7}},$$

aici $P_{\text{Fe } 1}$ reprezintă pierderile în oțelul statorului pentru armonica fundamentală, adică pentru tensiunea U_1 și frecvența f_1, deci practic pierderile în oțel în condiții nominale.

Cuplurile corespunzătoare armonicii fundamentale și armonicii μ sînt:

$$M_1 = \frac{m_1 p}{2\pi f_1} \cdot \frac{R'_2}{s} I'^2_2;$$

$$M_\mu = \frac{m_1 p}{2\pi f_1 \mu} \cdot \frac{R'_{2\mu}}{s_\mu} I'^2_{2\mu}.$$

Scanned with OKEN Scanner

Deci

$$\frac{M}{M_1} = \frac{R'_{2\mu}}{R'_2} \cdot \frac{1}{\mu} \cdot \frac{s}{s_\mu} \left(\frac{I'_{2\mu}}{I'_2} \right)^2 .$$

Cuplurile de frînare de ordinul $\mu = 5, 11, \ldots$ se scad din cuplul armonicii fundamentale, iar cuplurile motoare de ordinul $\mu = 7, 13, \ldots$ se adună la cuplul motor astfel încît se poate admite că efectele armonicilor superioare asupra cuplului armonicii fundamentale se compensează.

Pentru a pune în evidență efectul alimentării motorului asincron de la un convertor, se vor expune după [34] rezultatele obținute pe baza încercărilor experimentale efectuate asupra unui motor asincron de 5,5 kW cu conexiune triunghi și rotorul cu colivie. S-au comparat diferitele rezultate obținute pentru două situații: alimentarea cu o tensiune alternativă sinusoidală, alimentarea cu o tensiune alternativă dreptunghiulară.

Tensiunea alternativă dreptunghiulară a fost obținută de la un convertor, a cărui schemă de principiu pentru partea de putere este reprezentată în fig. 3.41. În schemă sînt reprezentate tiristoarele, inductanțele, diodele și rezistențele. Este reprezentată intrarea cu tensiune de curent continuu și ieșirea cu curent alternativ trifazat de frecvență variabilă, de la care se alimentează motorul asincron.

În fig. 3.42 sînt reprezentate valorile eficace ale armonicilor tensiunii la borne în funcție de cuplul motorului, obținute cu ajutorul unui analizor de unde.

În fig. 3.43 sînt reprezentate valorile eficace ale armonicilor curentului în funcție de cuplul motorului, obținute experimental.

În fig. 3.44 sînt reprezentate curbele pierderilor la funcționarea în gol $P_0 - 3R_1 I_0^2$ în funcție de valoarea eficace a armonicii fundamentale a tensiunii.

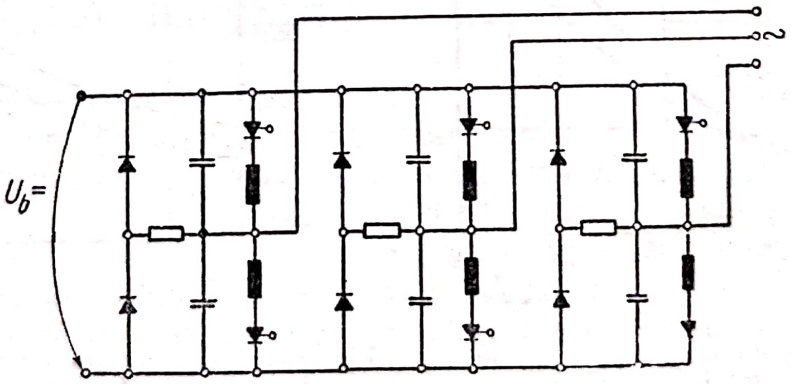


Fig. 3.41. Schema de principiu a părții de putere a unui convertor pentru alimentarea unui motor asincron cu tensiune alternativă de formă dreptunghiulară de frecvență reglabilă.

În fig. 3.45 sînt reprezentate curbele pierderilor totale în funcție de cuplu.

Deoarece armonicile superioare ale cîmpului magnetic au o turație mare față de rotor și aceasta nu variază decît puțin cu alunecarea, pier-

Scanned with OKEN Scanner

derile în rotor datorite armonicilor superioare ale tensiunii nu variază cu turaţia, deci cu sarcina, decît foarte puţin. De asemenea, din motive similare impedanţa maşinii fictive de ordinul μ nu variază mult cu tura-

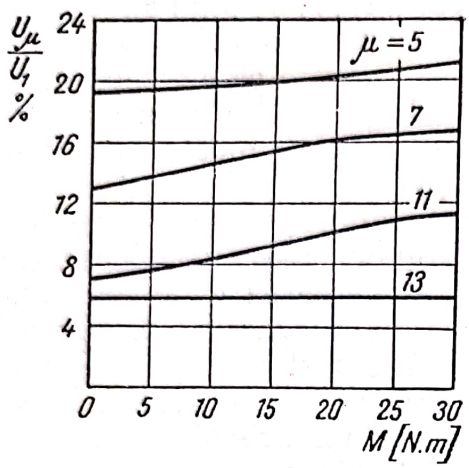


Fig. 3.42. Raportul dintre valorile eficace ale armonicelor tensiunii de alimentare de ordinul n şi cele ale armonicii fundamentale, în funcţie de cuplu.

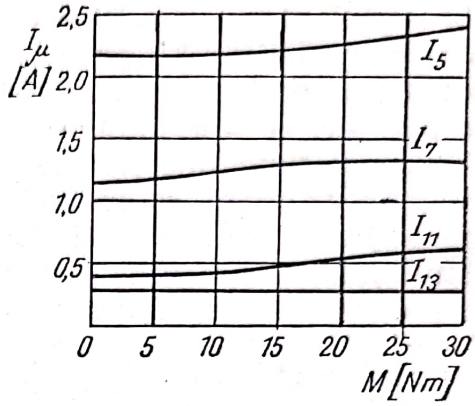


Fig. 3.43. Valorile eficace ale armonicelor curentului în funcţie de cuplu.

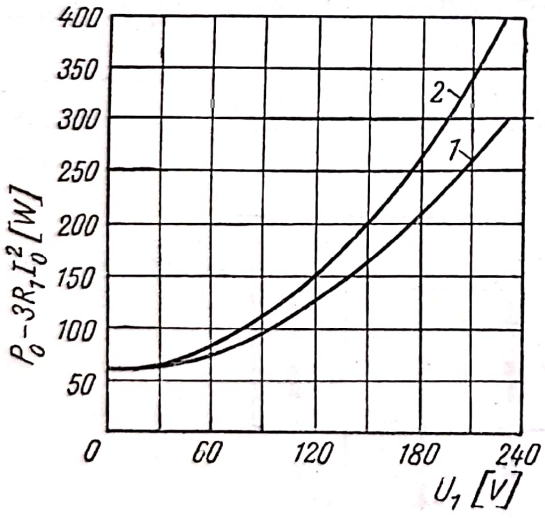


Fig. 3.44. Dependenţa pierderilor la funcţionarea în gol $P_0—3R_1I_0^2$ de valoarea eficace a armonicii fundamentale a tensiunii la borne:

1 — măsurată la alimentarea cu tensiune sinusoidală; *2* — măsurată la alimentarea cu tensiune dreptunghiulară.

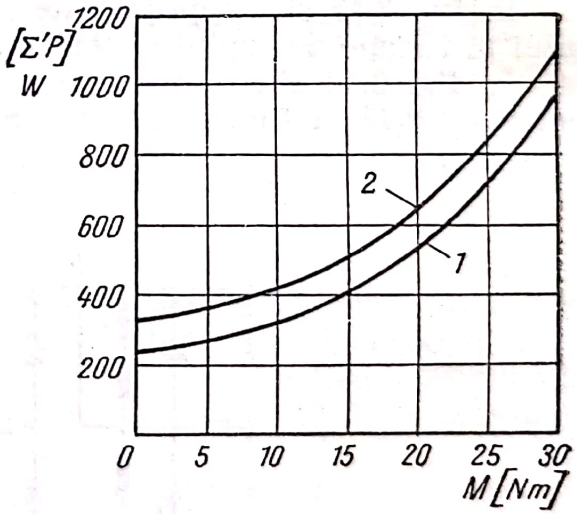


Fig. 3.45. Dependenţa pierderilor totale în motor în funcţie de cuplu:

1 — măsurate la alimentarea cu tensiune sinusoidală; *2* — măsurate la alimentarea cu tensiune dreptunghiulară.

ţia, deci cu sarcina şi prin urmare armonicile curentului determinate de armonicile tensiunii nu variază mult cu sarcina. Astfel, creşterea pierderilor în conductoarele înfăşurărilor determinată de forma nesinusoidală a tensiunii de alimentare nu depinde decît puţin de sarcină.

Scanned with OKEN Scanner

Rezultă că mărirea pierderilor totale în mașină, datorită formei nesinusoidale a undei tensiunii de alimentare este aproximativ aceeași la funcționarea în gol și la funcționarea în sarcină. Rezultatele încercărilor experimentale expuse confirmă această considerație.

În concluzie, la alimentarea unui motor asincron de la un convertor, apar armonici superioare în curba tensiunii care produc armonici superioare ale curentului și cîmpului. Aceste armonici ale curentului și cîmpului determină o creștere a pierderilor în conductoarele înfășurărilor și în oțel.

Pentru a determina creșterea pierderilor produse de alimentarea de la un convertor, la funcționarea unei mașini asincrone este practic suficient să se compare rezultatele măsurării pierderilor la funcționarea în gol a motorului alimentat cu tensiune nesinusoidală, respectiv cu tensiune sinusoidală, pentru aceeași valoare a armonicii fundamentale a tensiunii. Creșterea pierderilor la funcționarea în gol este egală cu diferența pierderilor măsurate în cele două cazuri. La funcționarea în sarcină se obține practic aceeași valoare a creșterii pierderilor ca și la funcționarea în gol, dacă forma tensiunii convertorului este aceeași la funcționarea în sarcină, ca și la funcționarea în gol.

Creșterea pierderilor care se produce datorită alimentării motorului de la un convertor trebuie cunoscută pentru toate cazurile cînd se utilizează instalații convertor-motor asincron. Astfel se poate aprecia dacă funcționarea motorului este admisibilă din punct de vedere al încălzirii.

3.12. FUNCȚIONAREA MOTOARELOR ASINCRONE ÎN REGIMURI NESIMETRICE SAU DEZECHILIBRATE

În cadrul regimurilor anormale de funcționare ale motorului asincron, care prezintă un interes mare în exploatare, intră și funcționarea motorului asincron alimentat de la o rețea cu un sistem de tensiuni nesimetrice. După cum este cunoscut, cele trei tensiuni de fază sau de linie ale unei rețele trifazate constituie un sistem simetric, dacă toate au aceeași valoare eficace și dacă sînt defazate în timp una față de alta cu 120 grade. Dacă una din aceste condiții nu este îndeplinită, sistemul de tensiuni este nesimetric.

De asemenea, dacă rezistențele sau reactanțele celor trei faze nu sînt egale între ele, receptorul este dezechilibrat.

Pot exista cazuri cînd sistemul de tensiuni să fie nesimetric iar motorul să fie un receptor dezechilibrat [4, 5, 38, 39].

Dintre regimurile de funcționare nesimetrice sau dezechilibrate care pot apărea mai des fac parte: întreruperea unei faze a înfășurării statorului sau rotorului, scurtcircuitele nesimetrice și funcționarea motorului la o tensiune trifazată nesimetrică.

Scanned with OKEN Scanner

Motorul asincron poate ajunge să funcţioneze cu o fază întreruptă fie ca urmare a întreruperii unui fir de alimentare al reţelei, fie ca urmare a întreruperii unei faze în interiorul motorului.

Ca urmare a întreruperii unei faze (fig. 3.46), înfăşurarea primară a motorului constituie un circuit monofazat. Deci se obţine un motor cu înfăşurarea statorului (înfăşurarea primară) monofazată dar înfăşurarea rotorului rămîne trifazată. Un astfel de motor se numeşte motor asincron monofazat.

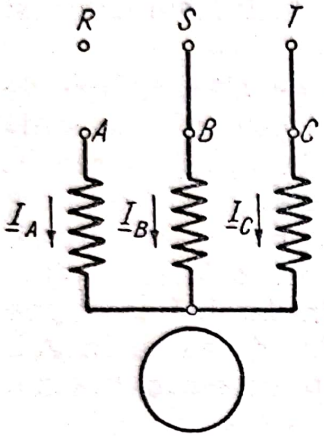


Fig. 3.46. Motor asincron cu conexiunea în stea cu neturul izolat, o linie a reţelei de alimentare fiind întreruptă.

Funcţionarea motorului asincron monofazat se poate explica destul de uşor, folosind teorema după care un cîmp magnetic alternativ sinusoidal variabil în timp şi cu o repartiţie sinusoidală în spaţiu se poate descompune în două cîmpuri învîrtitoare, a căror amplitudine este jumătate din amplitudinea cîmpului magnetic alternativ; aceste două cîmpuri se rotesc în sensuri contrare, cu viteza unghiulară $\frac{\omega}{P}$, unde $\omega=2\pi f$ este pulsaţia cîmpului magnetic alternativ, iar p este numărul perechilor de poli.

Un cîmp magnetic alternativ sinusoidal variabil în timp, cu o repartiţie sinusoidală în spaţiu, are inducţia magnetică în întrefier dată de relaţia

$$b_x=B_m \sin \omega t \cos \frac{\pi}{\tau} x,$$

unde x este distanţa măsurată în lungul circumferinţei începînd de la un punct situat în axa cîmpului. Expresia inducţiei se poate transforma pe baza unei identităţi trigonometrice astfel:

$$b_x=\frac{1}{2}B_m \sin \left(\omega t+\frac{\pi}{\tau}x\right)+\frac{1}{2}B_m \sin \left(\omega t-\frac{\pi}{\tau}x\right),$$

iar fiecare termen din membrul al doilea reprezintă un cîmp magnetic învîrtitor, şi deci teorema este demonstrată.

Se va considera că rotorul se învîrteşte cu turaţia n. Cîmpul magnetic învîrtitor direct se învîrteşte faţă de stator cu turaţia $n_{d1}=n_1=\frac{60f}{p}$. Alunecarea rotorului faţă de cîmpul magnetic învîrtitor direct este

$$s_d=s=\frac{n_1-n}{n_1}$$

şi aceasta va fi denumită alunecarea principală.

Cîmpul magnetic învîrtitor se învîrteşte faţă de stator cu turaţia

$$n_{1i}=-n_1=-\frac{60f}{p}.$$

Scanned with OKEN Scanner

Alunecarea rotorului față de cîmpul magnetic învîrtitor invers este

$$s_i = \frac{n_{1i} - n}{n_{1i}} = \frac{-n_1 - n}{-n_1} = \frac{-n_1 - (1-s)\,n_1}{-n_1} = 2 - s.$$

Cîmpul magnetic învîrtitor direct induce în rotor, ca la o mașină asincronă obișnuită, un sistem de curenți polifazat de frecvența

$$f_{2d} = s_d f = sf.$$

Cîmpul magnetic învîrtitor invers induce în rotor un sistem de curenți polifazat de frecvența:

$$f_i = s_i f = (2 - s)f.$$

Astfel, într-o mașină asincronă monofazată există două mașini asincrone fictive, una directă iar alta inversă. Fiecăreia din aceste mașini fictive îi corespunde dezvoltarea unui cuplu, iar cuplul rezultant este suma acestor cupluri. Cuplurile direct, invers și rezultant ale unui motor monofazat sînt reprezentate în fig. 3.47.

Din examinarea curbei cuplului rezultant se vede că la pornire ($s=1$), cuplul rezultant este nul. Dacă rotorului i se imprimă o turație n într-un anumit sens, atunci $s \neq 1$ și motorul dezvoltă un cuplu, care tinde să rotească motorul în sensul în care i s-a imprimat impulsul.

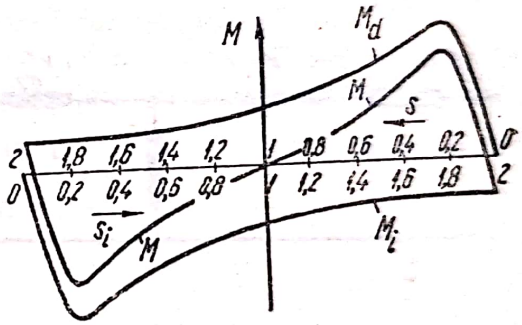


Fig. 3.47. Cuplurile direct, invers și rezultant ale mașinii asincrone monofazate.

Din cele expuse rezultă următoarele diferențe fundamentale între motoarele asincrone monofazate și cele polifazate.

La motoarele polifazate există un anumit cuplu de pornire; la sincronism, nu există curent în rotor.

La motoarele monofazate, nu există cuplu de pornire ($M=0$); chiar la sincronism, în rotor există curent și anume acesta este produs de cîmpul invers și are frecvența $f_i = 2f$.

Din considerarea curbei cuplului în funcție de alunecare rezultă că efectul întreruperii unei faze este diferit, după cum întreruperea se produce cînd motorul este în repaus sau în mișcare. Dacă motorul este în repaus și are o fază statorică întreruptă, atunci la conectarea la rețea motorul nu pornește. Dacă întreruperea fazei se produce cînd motorul are o alunecare nu prea mare, atunci motorul continuă să funcționeze, deoarece dezvoltă un cuplu, dar caracteristicile mașinii sînt modificate. Deși fenomenele principale sînt aceleași, totuși există diferite particularități în funcție de tipul conexiunii înfășurării statorului.

Scanned with OKEN Scanner

3.12.1. Întreruperea unei linii a rețelei de alimentare a unui motor trifazat cu înfășurarea statorică conectată în stea cu nulul izolat

Calculul caracteristicilor. Schema motorului pentru acest caz este reprezentată în fig. 3.46.

Dacă mașinile directă și inversă ar fi considerate separat, atunci s-ar obține schemele echivalente din fig. 3.48, unde s-a ținut seama că alune-

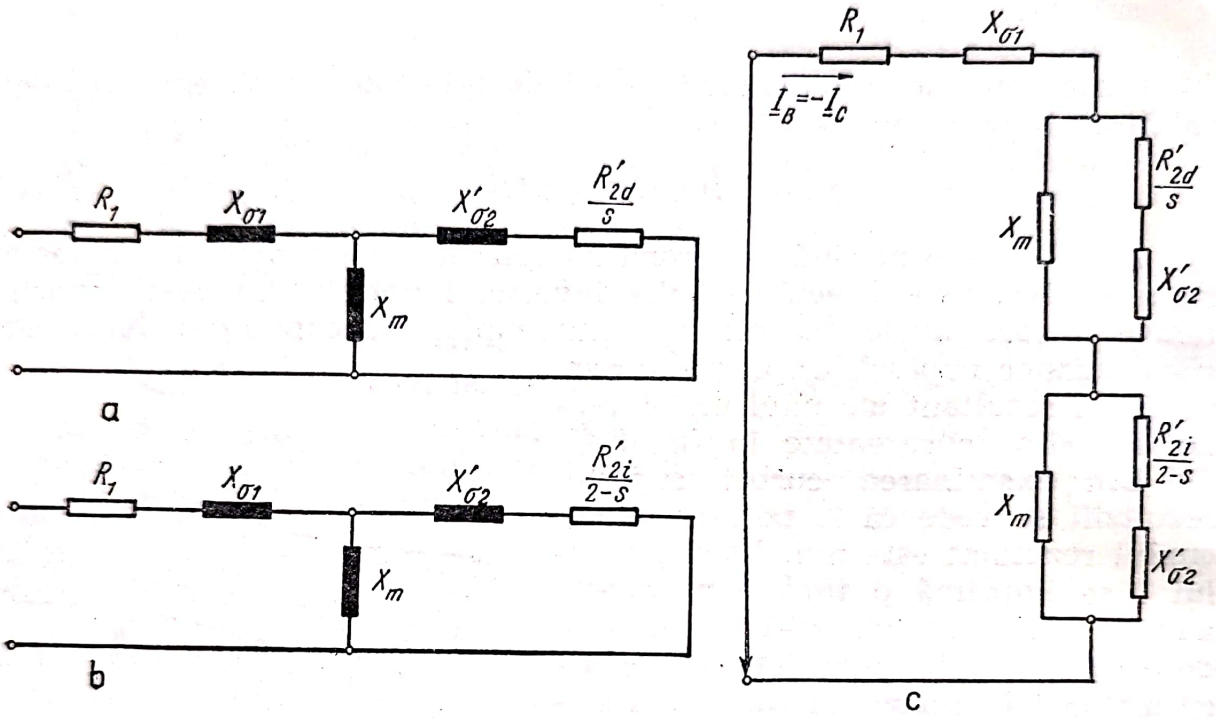


Fig. 3.48. Schema echivalentă a mașinii asincrone fictive:
a — impedanța $\underline{Z}_d$ a mașinii directe; *b* — impedanța $\underline{Z}_i$ a mașinii inverse; *c* — schema echivalentă rezultantă a mașinii.

carea mașinii directe este $s_d = s$, iar alunecarea mașinii inverse $s_i = 2 - s$. Parametrii rotorului depind de frecvență: R'_{2d} reprezintă rezistența rotorului la frecvența sf, iar R'_{2i} rezistența rotorului la frecvența $(2-s)f$. Într-o primă aproximație se poate considera

$$R'_{2d} = R'_{2i} = R'_2.$$

Variația inductanțelor în funcție de frecvență fiind mai mică nu a mai fost luată în considerare.

Se demonstrează că expresiile intensităților curenților mașinii directe și inverse I_d și I_i sînt:

$$I_d = -I_i = j \frac{\underline{U}_1}{\sqrt{3}(\underline{Z}_d + \underline{Z}_i)}, \qquad (3.111)$$

iar curentul pe fază (fig. 3.46),

$$I_B = -I_C = \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i}, \qquad (3.112)$$

unde $\underline{U}_1$ este tensiunea de linie aplicată motorului, iar impedanțele $\underline{Z}_d$ și $\underline{Z}_i$ sînt cele de la bornele circuitelor din fig. 3.48.

Pentru a calcula cuplul electromagnetic mai simplu, se va neglija curentul de magnetizare. Se ține seama că mașina directă dezvoltă un cuplu electromagnetic într-un sens, iar mașina inversă în sens contrar. Se obține pentru cuplul electromagnetic expresia:

$$M_{em}=M_{em\,d}-M_{em\,i}=\frac{3p}{\omega}\left(I_d^2\frac{R'_{2d}}{s}-I_i^2\frac{R'_{2i}}{2-s}\right)$$

sau, înlocuind expresiile curenților și notînd

$$X_k=X_{\sigma 1}+X'_{\sigma 2}, \tag{3.113}$$

$$M=\frac{p}{\omega}U_1^2\frac{\frac{R'_{2d}}{s}-\frac{R'_{2i}}{2-s}}{\left(2R_1+\frac{R'_{2d}}{s}+\frac{R'_{2i}}{2-s}\right)^2+4X_k^2}. \tag{3.114}$$

Din această expresie reiese, că la conectarea la rețea a motorului cu o fază întreruptă, cuplul este nul, deci motorul nu va porni.

Se va considera acum cazul în care întreruperea fazei s-a produs în timpul funcționării motorului cu o alunecare mică. În acest caz în expresia (3.114) se va neglija termenul $\frac{R'_{2i}}{2-s}$ atît la numărător cît și la numitor față de ceilalți termeni și expresia (3.114) devine

$$M=\frac{p}{\omega}U_1^2\frac{\frac{R'_2}{s}}{\left(2R_1+\frac{R'_{2d}}{s}\right)^2+4X_k^2}. \tag{3.115}$$

Pentru a găsi alunecarea la care cuplul dat de relația (3.115) este maxim, se calculează derivata dP_{em}/ds și se rezolvă ecuația.

$$\frac{dM}{ds}=4\left(R_1^2+X_k^2\right)-\left(\frac{R'_{2d}}{s}\right)^2=0;$$

se găsește

$$s_{Kd}=\frac{R'_{2d}}{2\sqrt{R_1^2+X_k^2}}. \tag{3.116}$$

Înlocuind valoarea dată de expresia (3.116) în relația (3.115), se obține valoarea maximă a cuplului electromagnetic,

$$M_{K1}=\frac{p}{\omega}U_1^2\frac{1}{4\left(R_1+\sqrt{R_1^2+X_k^2}\right)}. \tag{3.117}$$

Scanned with OKEN Scanner

Dacă se neglijează R_1, expresia (3.115) devine

$$M = \frac{p}{\omega} U_1^2 \frac{\frac{R'_{2d}}{s}}{\left(\frac{R'_{2d}}{s}\right)^2 + 4X_k^2}.$$

În cazul motorului trifazat

$$M_K = \frac{p}{\omega} U_1^2 \frac{1}{2X_k}$$

și

$$s_K = \frac{R'_{2d}}{X_k},$$

deci

$$\frac{M}{M_K} = \frac{2}{\frac{R'_{2d}}{sX_k} + 4\frac{X_k}{\frac{R'_{2d}}{s}}} = \frac{2}{\frac{s_K}{s} + 4\frac{s}{s_K}}$$

sau

$$\frac{M}{M_n} = \frac{2b_n}{\frac{s_K}{s} + 4\frac{s}{s_K}}; \quad \left(s_{Kd} = \frac{1}{2} s_K\right);$$

pentru regim normal $s = s_{n1}$ și rezolvînd ultima ecuație,

$$\frac{s_{Kd}}{s_{n1}} = \frac{b_n}{2} + \sqrt{\left(\frac{b_n}{2}\right)^2 - 1}.$$

Din relațiile (3.116) și (3.117) reiese că alunecarea critică și cuplul maxim vor fi de două ori mai mici în cazul întreruperii unei faze a statorului față de cazul funcționării normale.

Este util să se scoată în evidență că dacă în regim normal, adică înainte de întreruperea unei faze a statorului, motorul a funcționat la sarcină nominală, iar cuplul maxim al motorului este puțin peste dublul cuplului nominal, atunci după întreruperea unei faze a statorului, motorul va funcționa aproape de alunecarea critică.

Se va examina acum curentul statoric, de asemenea pentru cazul alunecărilor mici. Acest curent este suma geometrică dintre curentul rotoric raportat la stator și curentul de magnetizare.

Curentul rotoric raportat la stator în cazul cînd o fază a statorului

este întreruptă, dacă se neglijează curentul de magnetizare, este egal cu intensitatea curentului statoric și este dat de relația (3.112)

$$(I'_2)_1 = \frac{U_2}{\sqrt{\left(2R_1 + \frac{R'_{2d}}{s}\right)^2 + 4X_k^2}}$$

sau, dacă se neglijează R_1 față de $\frac{R'_{2d}}{s}$, se obține

$$(I'_2)_1 = \frac{U_2}{\sqrt{\left(\frac{R'_{2d}}{s}\right)^2 + 4X_k^2}}. \tag{3.118}$$

Pentru a arăta că este vorba de cazul monofazat s-a utilizat paranteză și indicele 1, iar pentru a arăta că este vorba de cazul trifazat se va utiliza paranteză și indicele 3. Valoarea eficace a tensiunii de fază a fost notată cu U_f.

În cazul în care o fază a statorului nu ar fi întreruptă, s-ar obține (admițînd aceleași simplificări) expresia cunoscută a curentului rotoric raportat la stator,

$$(I'_2)_3 = \frac{U_2}{\sqrt{3}\sqrt{\left(\frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_k^2}}. \tag{3.119}$$

Avînd în vedere că alunecarea critică în cazul neglijării rezistenței statorice este dată de relația

$$s_K = \frac{R'_2}{X_k}$$

pentru mașina trifazată, respectiv

$$s_{Kd} = \frac{R'_2}{2X_k}$$

pentru mașina monofazată, expresia (3.119) devine

$$(I'_2)_3 = \frac{U_2}{\sqrt{3}X_k\sqrt{\left(\frac{s_K}{s}\right)^2 + 1}} \tag{3.120}$$

iar expresia (3.118) devine

$$(I'_2)_1 = \frac{U_2}{2X_k\sqrt{\left(\frac{s_{Kd}}{s}\right)^2 + 1}}. \tag{3.121}$$

Scanned with OKEN Scanner

Se va considera că în ambele situații, adică statorul cu o fază întreruptă și statorul fără nici o fază întreruptă, motorul funcționează la cuplu nominal. Fie s_{n1} alunecarea cînd statorul are o fază întreruptă și s_n cînd statorul nu are nici o fază întreruptă. Pentru aceste situații se obțin curenții

$$(I'_{2n})_1 = \frac{U_1}{2X_k\sqrt{\left(\frac{s_{Kd}}{s_{n1}}\right)^2+1}},$$

$$(I'_{2n})_3 = \frac{U_1}{\sqrt{3}X_k\sqrt{\left(\frac{s_K}{s_n}\right)^2+1}}.$$

Înlocuind în ultimele două relații, expresiile $\frac{s_{Kd}}{s_{n1}}$ și $\frac{s_K}{s_n}$ și utilizînd relația (3.17 b), se obține

$$(I'_{2n})_1 = \frac{U_1}{2\sqrt{2}X_k\sqrt{\frac{b_n}{2}\left[\frac{b_n}{2}+\sqrt{\left(\frac{b_n}{2}\right)^2-1}\right]}}; \tag{3.122}$$

$$(I'_{2n})_3 = \frac{U_1}{\sqrt{6}\,X_k\sqrt{b_n\left(b_n+\sqrt{b_n^2-1}\right)}}. \tag{3.123}$$

Raportul dintre curenții rotorici raportați la stator, în cazul cînd este întreruptă o fază la stator și în cazul cînd nu este întreruptă nici una, este:

$$\frac{(I'_{2n})_1}{(I'_{2n})_3} = \frac{\sqrt{3}\sqrt{b_n+\sqrt{b_n^2-1}}}{\sqrt{b_n+\sqrt{b_n^2-4}}}. \tag{3.124}$$

În fig. 3.49, *a* este reprezentată curba

$$\frac{(I'_{2n})_1}{(I'_{2n})_3} = f(b_n).$$

Din această curbă rezultă că la motorul asincron cu o fază întreruptă, la cuplul nominal, curentul este întotdeauna mai mare cu peste 70% decît la motorul fără o fază întreruptă.

În mod analog ca mai înainte, se poate arăta că, dacă motorul lucrează la un cuplu M mai mic decît cel nominal și se notează

$$m_c = \frac{M}{M_n},$$

Scanned with OKEN Scanner

se obține

$$\frac{(I'_2)_1}{(I'_2)_3} = \frac{\sqrt{3}\sqrt{m_c}\sqrt{b_n+\sqrt{b_n^2-1}}}{\sqrt{\frac{b_n}{m_c}+\sqrt{\left(\frac{b_n}{m_c}\right)^2-4}}}. \qquad (3.125)$$

În fig. 3.49, *b* este reprezentată curba

$$\frac{(I'_2)_1}{(I'_2)_3} = f(m_c)$$

pentru $b_n=2$.

Din fig. 3.49, *b* rezultă că la cupluri mai mari decît 0,57 M_n curentul este totdeauna mai mare la motorul cu o fază întreruptă.

Raportul dintre componenta reactivă și componenta activă a curentului $(I'_{2n})_1$ este

$$\operatorname{tg}\varphi'_{n1} = \frac{1}{\frac{b_n}{2}+\sqrt{\left(\frac{b_n}{2}\right)^2-1}} \qquad (3.126)$$

iar raportul dintre componenta reactivă și componenta activă a curentului $(I'_{2n})_3$

$$\operatorname{tg}\varphi'_{n3} = \frac{1}{b_n+\sqrt{b_n^2-1}}. \qquad (3.127)$$

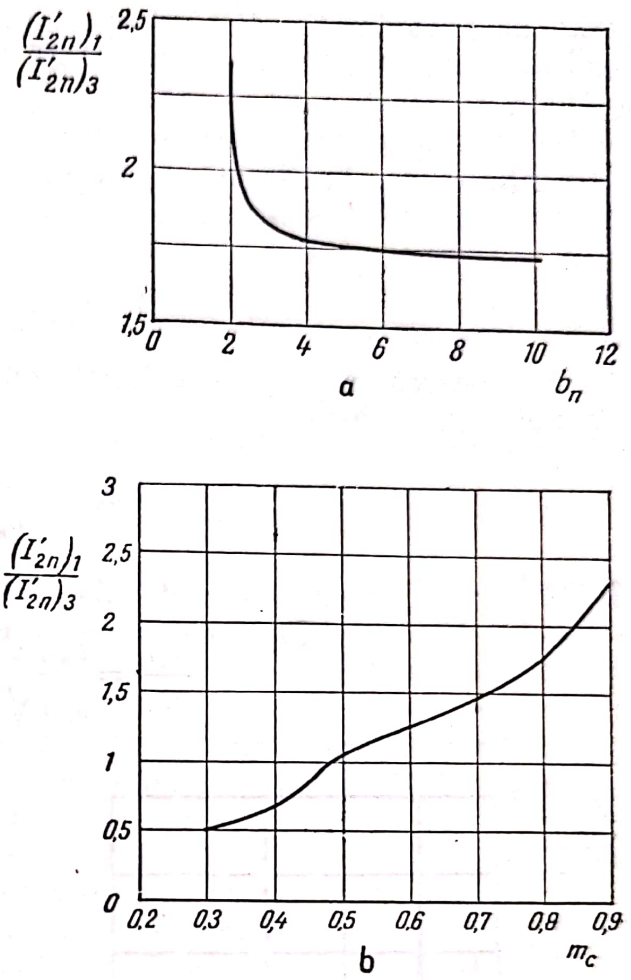


Fig. 3.49. Raportul dintre curentul de linie statoric al unui motor asincron raportat la stator, în cazul unei faze întrerupte și în cazul nici unei faze întrerupte:

a — la cuplul nominal; *b* — la cuplul $m_c=\frac{M}{M_n}$ pentru $b_n=\frac{M_k}{M_n}=2$.

Expresia curentului statoric al motorului cu o fază întreruptă la stator, dacă se neglijează componenta activă a curentului de funcționare în gol, este

$$(I_1)_1 = \sqrt{[(I'_2)_1\cos\varphi_1']^2+[(I'_2)_1\sin\varphi'_1+\sqrt{3}\,I_0]^2}, \qquad (3.128)$$

unde I_0 este curentul de funcționare în gol al motorului normal fără o fază întreruptă la stator.

Expresia curentului statoric al motorului normal este

$$(I_1)_3 = \sqrt{[(I'_2)_3\cos\varphi'_3]^2+[(I'_2)_3\sin\varphi'_3+I_0]^2}. \qquad (3.129)$$

Curentul de funcționare în gol. După cum se poate stabili pe baza schemei echivalente din fig. 3.48, *c*, în care se introduce $s=0$, curentul de funcționare în gol al motorului asincron cu o fază statorică întreruptă

Scanned with OKEN Scanner

este de aproximativ $\sqrt{3}$ ori mai mare decît curentul de funcţionare în gol al motorului asincron fără o fază statorică întreruptă.

În concluzie deci, la acelaşi cuplu, curentul statoric al motorului cu o fază întreruptă este simţitor mai mare decît al motorului normal.

Alunecarea la sarcină nominală. La sarcină nominală alunecarea motorului asincron normal este, după cum s-a arătat anterior,

$$(s_n)_3 = \frac{s_K}{b_n + \sqrt{b_n^2 - 1}},$$

iar alunecarea motorului asincron cu o fază întreruptă la stator pentru aceeaşi sarcină este

$$(s_n)_1 = \frac{s_K}{b_n + \sqrt{b_n^2 - 4}}$$

şi deci

$$\frac{(s_n)_1}{(s_n)_3} = \frac{b_n + \sqrt{b_n^2 - 1}}{b_n + \sqrt{b_n^2 - 4}}. \qquad (3.130)$$

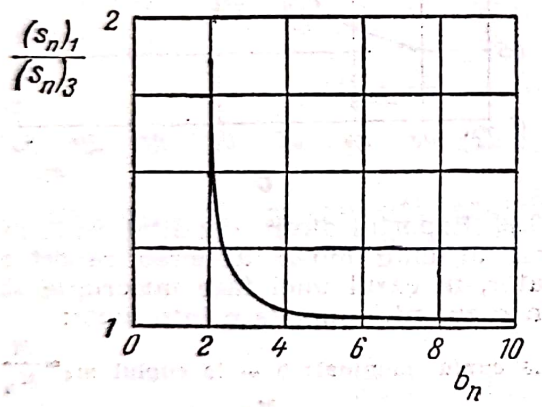


Fig. 3.50. Raportul dintre alunecarea motorului cu o fază întreruptă şi cea a motorului fără nici o fază întreruptă, la sarcină nominală, în funcţie de raportul $b_n = \frac{M_m}{M_n}$ al motorului normal.

În fig. 3.50 este reprezentată curba

$$\frac{(s_n)_1}{(s_n)_3} = f(b_n).$$

Din fig. 3.50 rezultă că pentru valori mai mari ale raportului $\frac{M_K}{M_n}$, alunecarea practic nu variază la întreruperea unei faze a statorului.

Pierderile în motor la întreruperea unei faze a statorului. Pierderile în înfăşurarea rotorului la motorul cu o fază întreruptă la stator, se pot calcula uşor dacă în schema echivalentă din figura 3.48, *c* se neglijează curenţii de magnetizare,

$$(P_{Cu\,2})_1 = (R'_{2a} + R'_{2i})\,(I'^2_2)_1,$$

iar $(I'_2)_1$ este dat de relaţia (3.121).

La motorul fără o fază întreruptă la stator se obţine

$$(P_{Cu\,2})_3 = m\,R'_{2a}\,(I'_2)^2_3,$$

iar curentul $(I'_2)_3$ este dat de relaţia (3.120).

Scanned with OKEN Scanner

Deci raportul pierderilor este ($m=3$ faze)

$$k_{Cu\,2}=\frac{(P_{Cu\,2})_1}{(P_{Cu\,2})_3}=\frac{R'_{2a}+R'_{2t}}{3R'_{2a}}\cdot\frac{(I'_2)^2_1}{(I'_2)^2_3}. \qquad (3.131)$$

Calculele pentru diferite cazuri arată că raportul $k_{Cu\,2}$ este în general mai mare decît 2 şi poate deseori să ajungă aproximativ la 4.

Pierderile în înfăşurarea statorului cresc aproximativ în aceeaşi proporţie ca şi pierderile din rotor.

Tensiunea la bornele motorului. După cum se poate arăta prin calcul sau se poate verifica experimental, dacă rotorul este în repaus, atunci tensiunea măsurată între borna care corespunde liniei de alimentare întrerupte şi una dintre celelalte două borne este jumătate din tensiunea de linie.

3.12.2. Întreruperea unei linii a reţelei de alimentare a unui motor trifazat cu înfăşurarea statorică conectată în triunghi

În acest caz a cărui schemă este dată în fig. 3.51, repartiţia curenţilor pe reţea va fi aceeaşi ca şi la cazul precedent însă repartiţia curenţilor în fazele statorului va fi diferită.

În adevăr, comparînd schemele din fig. 3.46 şi 3.51 se vede că în cazul din fig. 3.46 curentul trece numai prin două din fazele statorului, iar în cazul din fig. 3.51 curentul trece prin toate fazele statorului datorită conexiunii în triunghi.

Curenţii pe liniile de alimentare sînt:

$$\underline{I}_A=0; \qquad \underline{I}_B=-\underline{I}_C.$$

Calculul curenţilor din fazele înfăşurării legate în triunghi arată că se obţin următoarele expresii pentru curenţii din fazele triunghiului:

$$\underline{I}_{AB}=-\frac{\underline{I}_B}{3}; \quad \underline{I}_{BC}=+\frac{2\underline{I}_B}{3}; \quad \underline{I}_{CA}=-\frac{\underline{I}_B}{3}.$$

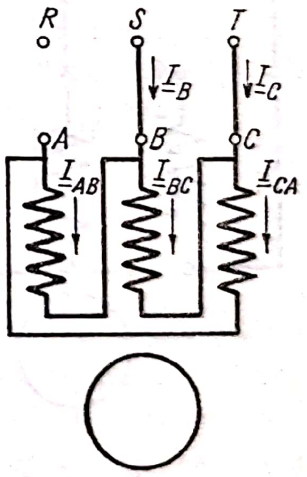


Fig. 3.51. Motor asincron cu conexiunea în triunghi, o linie a reţelei de alimentare fiind întreruptă

În cazul cînd nu este întreruptă nici o linie de alimentare, atunci între valorile eficace există relaţia

$$\underline{I}_{AB}=\frac{\underline{I}_B}{\sqrt{3}}.$$

Pentru aceeaşi valoare a curentului de linie I_B, în cazul unei linii de alimentare întrerupte, pe una din fazele înfăşurării motorului curentul creşte deci de $\frac{2}{\sqrt{3}}=1{,}15$ ori, iar pe celelalte două scade de $\frac{1}{\sqrt{3}}=0{,}57$ ori.

Scanned with OKEN Scanner

Raportul dintre pierderile în înfășurarea statorului la întreruperea unei linii de alimentare și pierderile în regim normal este același ca la înfășurarea cu conexiune în stea, tratată mai înainte.

Observație. *Dacă înfășurarea statorică are conexiunea în triunghi și se produce o întrerupere a înfășurării pe una din faze, în interiorul mașinii, se realizează exact aceeași situație ca cea studiată mai înainte la paragraful 3.12.1.*

3.12.3. Întreruperea unei linii a rețelei de alimentare a unui motor trifazat cu înfășurarea statorică conectată în stea cu conductor neutru

Schema acestui caz este dată în fig. 3.52.

Aici există o deosebire esențială față de cazurile tratate anterior și anume, înfășurarea statorică nu mai constituie un singur circuit alimentat monofazat. Datorită conductorului neutru care este aici legat, înfășurarea statorică cuprinde două circuite alimentate cu tensiuni la 120 grade. Ca urmare cîmpul magnetic produs de înfășurarea statorică nu va mai fi alternativ, ci va conține și o componentă învîrtitoare. Astfel cîmpul magnetic produs de stator cuprinde două cîmpuri învîrtitoare unul direct și altul invers; dar, spre deosebire de situația cînd nulul este izolat, aceste cîmpuri au aici amplitudini inegale. Din acest motiv cuplul dat de motor nu mai este nul cînd rotorul este în repaus. Deci condițiile de comportare ale motorului asincron, la întreruperea unei faze a statorului, sînt mai favorabile dacă există conductor neutru (sau cînd nulul este legat la pămînt). Calculele fiind aici mai complicate nu vor fi dezvoltate, dar se vor da unele rezultate.

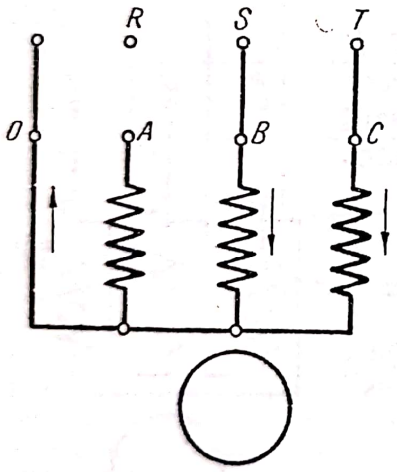


Fig. 3.52. Motor asincron cu conexiunea în stea cu conductor neutru, o linie a rețelei de alimentare fiind întreruptă.

Alunecarea critică și cuplul maxim ale motorului cu conexiune în stea cu conductor neutru, cu o fază întreruptă, sînt mai mici decît acelea ale motorului normal.

În fig. 3.53 este dată curba alunecarii motorului cu o fază întreruptă raportată la alunecarea nominală a motorului normal, în funcție de raportul $m_c = \frac{M}{M_n}$ pentru un motor cu $s_K = 0{,}1$ și $b_n = \frac{M_K}{M_n} = 2$.

Curentul rotoric raportat la stator are valori mai mici decît în cazul cînd nulul este izolat.

În fig. 3.54 este dată curba raportului $\frac{(I'_2)_1}{(I'_{2n})_3}$ în funcție de raportul $m_c = \frac{M}{M_n}$.

Motorul asincron cu conexiune în stea, cu conductor neutru, funcţionează chiar dacă sînt întrerupte două faze. Motorul cu două faze întrerupte este în principiu cu totul asemănător motorului asincron cu înfăşurarea statorului conectată în stea fără conductor neutru, cu o fază întreruptă, caracteristicile sînt însă mai defavorabile.

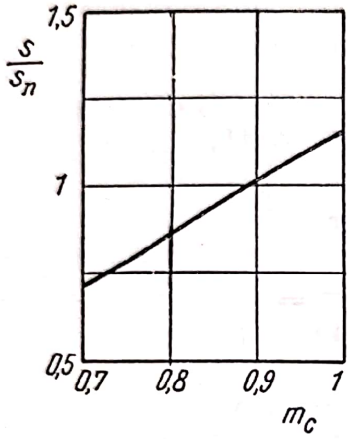


Fig. 3.53. Alunecarea motorului cu o fază întreruptă raportată la alunecarea nominală a motorului normal, în funcţie de raportul $m_c=\frac{M}{M_n}$ pentru motorul cu $s_K=0{,}1$ şi $b_n=\frac{M_K}{M_n}=2$.

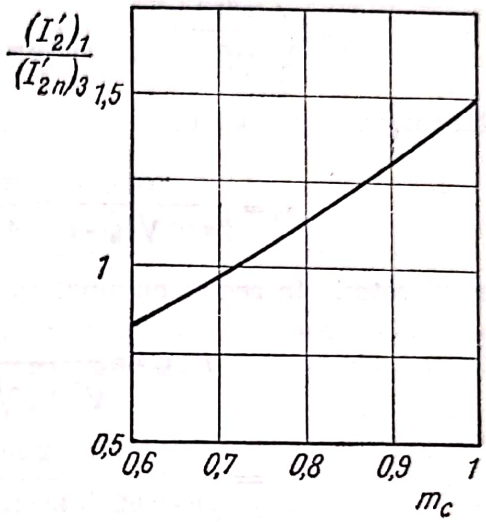


Fig. 3.54. Curentul motorului cu o fază întreruptă raportat la curentul nominal al motorului normal, în funcţie de raportul $m_c=\frac{M}{M_n}$, pentru motorul cu $s_K=0{,}1$ şi $b_n=\frac{M_K}{M_n}=2$.

Exemplu. Se va considera motorul studiat în lucrarea [8]. Se dă un motor asincron cu următoarele date: puterea nominală $P_n=736$ kW; tensiunea de linie $U_n=2\,200$ V; $R_1=0{,}075\,\Omega$; $R'_{2a}=0{,}083\,\Omega$; $R'_{2i}=0{,}140\,\Omega$; $X_k=0{,}626\,\Omega$; pierderile mecanice $P_{fr+v}=8$ kW; curentul de funcţionare în gol în condiţii normale $I_0=75{,}1$ A; conexiunea înfăşurării statorului în stea fără conductor neutru.

La funcţionarea motorului cu sarcina nominală s-a produs întreruperea unei faze. Se cere să se calculeze curentul, pierderile şi alunecarea după întreruperea fazei.

Se va considera mai întîi motorul normal trifazat.

Alunecarea critică este dată de relaţia

$$s_K\approx\frac{c_1R'_2}{\sqrt{R_1^2+X_k^2}}=\frac{0{,}083}{\sqrt{(0{,}075)^2+(0{,}626)^2}}=0{,}132.$$

Scanned with OKEN Scanner

Raportul dintre cuplul maxim și cuplul nominal, presupunînd $c_1 \approx 1$, este

$$b_n = \frac{M_K}{M_n} = mU_1^2 \frac{1}{2\,P_{em\,n}(R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_k^2})},$$

unde

$$P_{em\,n} = P + P_{fr+v} = 736 + 8 = 744 \text{ kW},$$

$$b_n = 3\left(\frac{2\,200}{\sqrt{3}}\right)^2 \frac{1}{2 \cdot 744[0{,}075 + \sqrt{(0{,}075)^2 + (0{,}626)^2}} = 4{,}6.$$

Alunecarea nominală este

$$s_n = \frac{s_K}{b_n + \sqrt{b_n^2 - 1}} = \frac{0{,}132}{4{,}6 + \sqrt{(4{,}6)^2 - 1}} = 0{,}0144,$$

iar curentul rotoric în regim nominal raportat la stator

$$(I'_{2n})_3 = \frac{U_1}{\sqrt{6}\,X_k \sqrt{b_n(b_n + \sqrt{b_n^2 - 1})}} =$$

$$= \frac{2\,200}{\sqrt{6} \cdot 0{,}626 \sqrt{4{,}6[4{,}6 + \sqrt{(4.6)^2 - 1}]}} = 220 \text{ A}.$$

Raportul dintre componenta reactivă și componenta activă a curentului $(I'_{2n})_3$ se calculează imediat,

$$\operatorname{tg}\varphi'_{n1} = \frac{1}{b_n + \sqrt{b_n^2 - 1}} = \frac{1}{4{,}6 + \sqrt{(4{,}6)^2 - 1}} = 0{,}109.$$

Curentul statoric va fi

$$(I_{1n})_3 = \sqrt{[(I'_2)_3^2 \cos\varphi'_3]^2 + [(I'_2)_3 \sin\varphi'_3 + I_0]^2};$$

$$\cos\varphi'_3 = 0{,}993; \quad \sin\varphi'_3 = 0{,}108;$$

$$(I_{1n})_3 = \sqrt{(220 \cdot 0{,}993)^2 + (220 \cdot 0{,}108 + 75{,}1)^2} = 240 \text{ A}.$$

Se va considera acum motorul monofazat.

Curentul rotoric la cuplul nominal raportat la stator este

$$(I'_{2n})_1 = \frac{U_1}{2\sqrt{2}X_k \sqrt{\frac{b_n}{2}\left[\frac{b_n}{2} + \sqrt{\frac{(b_n)^2}{2} - 1}\right]}} =$$

$$= \frac{2\,200}{2\sqrt{2} \cdot 0{,}626 \sqrt{2{,}3[2{,}3 + \sqrt{(2{,}3)^2 - 1}]}} = 394 \text{ A}.$$

Aunecarea la cuplul nominal va fi

$$(s_n)_1 = \frac{s_K}{b_n + \sqrt{b_n^2 - 4}} = \frac{0{,}132}{4{,}6 + \sqrt{(4{,}6)^2 - 1}} = 0{,}0151$$

Scanned with OKEN Scanner

Raportul dintre componenta reactivă și componenta activă a curentului statoric se calculează în mod analog:

$$\operatorname{tg}\varphi'_{n1}=\frac{1}{\frac{b_n}{2}+\sqrt{\left(\frac{b_n}{2}\right)^2-1}}=\frac{1}{2{,}3+\sqrt{(2{,}3)^2-1}}=0{,}229;$$

$$\cos\varphi'_{n1}=974; \qquad \sin\varphi'_{n1}=0{,}225;$$

$$(I'_{1n})_1=\sqrt{[(I'_2)\cos\varphi'_1]^2+[(I'_2)_1\sin\varphi'_1+\sqrt{3}I_0]^2}=$$

$$=\sqrt{(389\cdot 0{,}974)^2+(389\cdot 0{,}225+\sqrt{3}\cdot 75{,}1)^2}=437\text{ A}.$$

Deci rapoartele curenților rotorici și statorici sînt:

$$\frac{(I'_{2n})_1}{(I'_{2n})_3}=\frac{394}{220}=1{,}79; \qquad \frac{(I_{1n})_1}{(I_{1n})_3}=\frac{437}{240}=1{,}82.$$

Din calculele efectuate rezultă că alunecarea nu se modifică dacă la funcționarea motorului la sarcină nominală, se produce întreruperea unei faze a statorului, dar curenții cresc aproape de două ori.

3.12.4. Alimentarea motorului asincron de la o rețea cu un sistem nesimetric de tensiuni

Dacă se alimentează un motor asincron de la un sistem nesimetric de tensiuni, atunci curenții din fazele statorului nu formează nici ei un sistem simetric. Ca urmare, cîmpul magnetic din întrefierul mașinii are două componente care se rotesc în sensuri contrare: un cîmp magnetic învîrtitor direct și un cîmp magnetic învîrtitor invers.

Amplitudinile acestor două cîmpuri nu sînt egale între ele, cu excepția cazului particular al motorului monofazat.

Cîmpul direct induce în rotor tensiuni și curenți de frecvența $f_d=sf$, iar cîmpul invers induce în rotor curenți și tensiuni de frecvența $(2—s)f$. Astfel, se poate considera că în mașina reală există două mașini fictive, una directă și alta inversă. Cuplurile dezvoltate de cele două mașini sînt de sensuri contrare, iar cuplul rezultant este suma algebrică a celor două cupluri.

În cazul limită al nesimetriei monofazate, cele două cupluri au amplitudini egale, iar cînd rotorul este în repaus cuplul rezultant este nul, adică motorul nu poate porni singur.

În cazul general, cele două cupluri nu au amplitudinile egale, iar cînd rotorul este în repaus, cuplul este diferit de zero și motorul pornește.

Cuplul invers are rolul unui cuplu de frînare; de aceea, la același cuplu rezistent, curentul absorbit de mașină în acest caz de la rețea și alunecarea sînt mai mari decît cele de la motorul normal.

În sistemele energetice actuale se urmărește să se realizeze la toți consumatorii un sistem simetric de tensiuni, astfel încît alimentarea cu un sistem nesimetric de tensiuni poate apărea numai în caz de avarie.

Scanned with OKEN Scanner

Sistemul energetic național actual din țara noastră, este suficient de puternic, ca să asigure în general un sistem de tensiuni practic simetric la consumator. De aceea este suficient să se cunoască comportarea mașinii alimentată în mod normal cu un sistem trifazat simetric de tensiuni și cazurile de funcționare în regimurile speciale de alimentare cu un sistem nesimetric de tensiuni descrise mai înainte, care reprezintă situații de avarie întîlnite în mod frecvent.

3.12.5. Utilizarea motoarelor asincrone trifazate alimentate de la rețele monofazate

Mașina asincronă comparativ cu celelalte mașini este foarte simplă și sigură în funcționare, dar necesită pentru alimentare o rețea trifazată. Totuși în unele cazuri se dispune numai de o rețea monofazată. În aceste cazuri pentru a putea utiliza o mașină asincronă trifazată este necesar să se realizeze alimentarea mașinii asincrone cu un sistem trifazat de curenți mai mult sau mai puțin simetric. Aceasta se realizează prevăzînd cea de a treia fază a statorului cu o rezistență mărită sau cu o capacitate pentru a realiza defazarea curenților. Aceste soluții sînt binecunoscute și tratate, în lucrările de mașini electrice uzuale.

O altă soluție este conectarea motorului asincron trifazat la rețeaua monofazată prin intermediul unui convertor de faze.

În lucrarea [4] se arată că în statul Ilinois (S.U.A.) această soluție a fost aplicată pe scară largă la instalațiile rurale, unde sînt necesare motoare asincrone pînă la puteri de aproximativ 40 kW și s-au obținut bune rezultate.

3.12.6. Scurtcircuitarea fazelor statorului

În exploatare se produc frecvent scurtcircuite în rețeaua de alimentare a statorului mașinii asincrone. Cel mai frecvent se produce scurtcircuitul între două faze (denumit scurtcircuit bifazat) și de asemenea destul de des se produce scurtcircuitul pe o singură fază (denumit scurtcircuit monofazat). Pînă la acționarea sistemului de protecție, motorul va funcționa în regim nesimetric. De aceea este necesar să se examineze comportarea motorului în regimurile nesimetrice amintite. Se va considera că înfășurarea statorică este conectată în stea, care este situația cea mai frecventă.

Scurtcircuitarea a două faze ale statorului. Schema motorului la funcționarea cu două faze ale statorului scurtcircuitate este dată în fig. 3.55. Scurtcircuitul se poate produce fie în interiorul mașinii (fig. 3.55, *a*) fie la borne sau în exteriorul mașinii (fig. 3.55, *b*). Fenomenele sînt aceleași în ambele cazuri, diferă numai valorile care se obțin pentru diferitele mărimi caracteristice.

Scanned with OKEN Scanner

În esență fenomenele constă în următoarele. Datorită scurtcircuitului, la fel ca și în cazul întreruperii unei faze la stator, tensiunile și curenții din stator nu formează un sistem simetric. Ca urmare cîmpul magnetic din întrefierul mașinii va conține două cîmpuri componente, care se vor roti în sensuri contrare, unul în sensul direct și altul în sensul invers. Amplitudinile acestor două cîmpuri nu sînt în general egale. Aici este necesar să se facă o distincție între cazul din fig. 3.55, *a* și cazul din fig. 3.55, *b*.

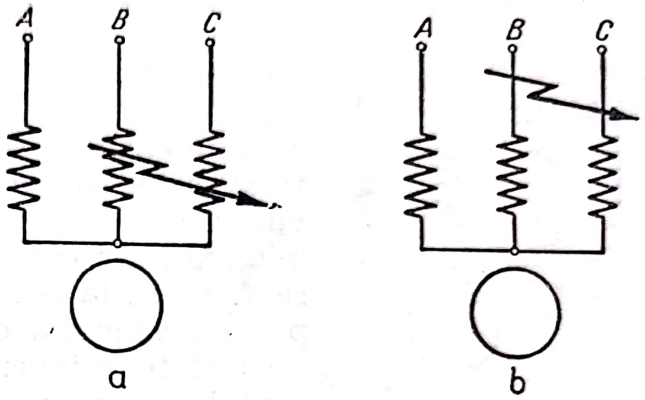


Fig. 3.55. Schema unui motor asincron cu două faze ale statorului scurtcircuitate:
a — scurtcircuit în interiorul mașinii; *b* — scurtcircuit la bornele mașinii sau pe rețea.

În fig. 3.55, *a* fazele *B* și *C* sînt alimentate parțial cu tensiuni de la fazele *B* și *C* ale rețelei și anume pe partea nescurtcircuitată iar pe partea scurtcircuitată a acestor faze (între punctul de scurtcircuit și nul) ele sînt alimentate cu tensiune de la faza *A*. Faza *A* este alimentată în întregime cu tensiune de la faza *A* a rețelei. De aceea înfășurarea statorului se va comporta ca o înfășurare trifazată, dar dezechilibrată electric. Ca urmare, se vor obține în întrefier două cîmpuri magnetice învîrtitoare unul direct și unul invers de amplitudini inegale.

În fig. 3.55, *b* fazele *B* și *C* sînt scurtcircuitate între borne și înfășurare, astfel încît statorul se prezintă ca la un motor monofazat și se va obține astfel o mașină monofazată, mașină care a fost tratată la paragraful 3.12.1. În acest caz, după cum s-a arătat, în întrefier se obține de asemenea un cîmp magnetic care se poate descompune în două cîmpuri componente, un cîmp învîrtitor direct și un cîmp învîrtitor invers, care au aceeași amplitudine, deci cazul din fig. 3.55, *b* reprezintă un caz particular al celui din fig. 3.55, *a*.

Deoarece în întrefierul mașinii există un cîmp magnetic învîrtitor direct și un cîmp magnetic învîrtitor invers, se poate considera că mașina reală conține două mașini fictive, una directă și alta inversă. Curentul și cuplul mașinii reale se pot obține însumînd curenții și cuplurile mașinilor fictive.

Descrierea fenomenelor rămîne aceeași ca la mașina cu stator monofazat, cu deosebirea că amplitudinile cîmpurilor învîrtitoare direct și invers nefiind egale în general, nici amplitudinile cuplurilor direct și invers nu vor mai fi egale, deci în general cuplul la $s=1$ nu mai este nul.

Pentru anumite valori ale parametrilor motorului și rețelei de alimentare, este posibil ca valoarea cuplului invers să fie mai mare decît valoarea cuplului direct și deci motorul va începe să se rotească în sens contrar.

Scanned with OKEN Scanner

Scurtcircuitarea unei faze a statorului. Se va examina aici cazul în care se produce scurtcircuitarea unei faze a înfășurării statorului conectat în stea și cu nulul izolat. Schema motorului este dată în fig. 3.56.

Deși o fază este scurtcircuitată, dar nu este întreruptă, circuitul statoric nu este monofazat, deoarece fazele au aplicate între ele cele două capete tensiuni defazate între ele. Datorită nesimetriei tensiunilor, cîmpul magnetic din întrefier va conține două componente: un cîmp magnetic învîrtitor direct și un cîmp magnetic învîrtitor invers. Înfășurarea statorică este dezechilibrată electric, dar nu este chiar în cazul limită, acela de circuit monofazat, astfel că amplitudinile celor două cîmpuri învîrtitoare sînt inegale. În această situație cuplul este micșorat, iar curentul este mărit. Dacă alimentarea se face de la o rețea de putere infinită, atunci se poate demonstra că amplitudinea cîmpului magnetic învîrtitor invers este nulă, și în această situație cuplul rămîne neschimbat, dar curentul crește din cauză că pe fiecare fază apar curenți suplimentari care nu sînt defazați între ei și nu dau cîmp învîrtitor și nici cuplu.

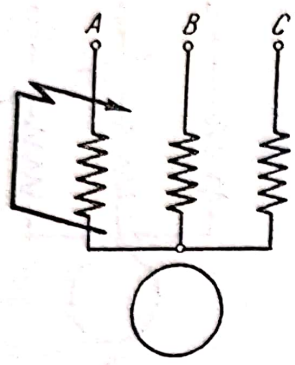


Fig. 3.56. Schema unui motor asincron cu o fază a statorului scurtcircuitată.

3.12.7. Funcționarea motorului asincron cu înfășurarea rotorică dezechilibrată electric

Studiul mașinilor asincrone cu înfășurarea rotorică dezechilibrată electric prezintă interes datorită faptului că dezechilibrul electric al înfășurării rotorului poate apărea destul de des. Dezechilibrul electric al rotorului se poate datori unui accident: la înfășurările bobinate întreruperea unei faze a rotorului; la înfășurările tip colivie, întreruperea unor bare ale coliviei rotorului.

Acest dezechilibru poate fi însă nu numai consecința unui accident, ci să fie datorit unei construcții speciale a mașinii. Astfel este cazul pornirii în asincron a motorului sincron, unde înfășurarea inductorului joacă rolul unui rotor monofazat, sau cazul funcționării în asincron a unor motoare asincrone-sincronizate sau, în fine, dezechilibrul circuitelor rotorice se poate datori utilizării reostatelor de construcție nesimetrică.

Principiul funcționării motoarelor asincrone trifazate cu circuitul rotoric dezechilibrat. De la început se va presupune că sistemul de tensiuni aplicat statorului mașinii este un sistem simetric. În general, circuitul primar al mașinii asincrone este constituit de circuitul statoric, iar circuitul secundar de circuitul rotoric (fig. 3.57).

Cîmpul învîrtitor de inducție b_1, produs de primar avînd turația $n_1=\frac{60f}{p}$, induce în circuitul secundar care se rotește cu turația n, un sistem simetric de tensiuni electromotoare U_{ed2} de frecvență $f_2=sf$. Aceste

Scanned with OKEN Scanner

tensiuni electromotoare vor stabili în circuitul secundar un sistem nesimetric de curenți, datorită faptului că impedanțele de pe diferitele faze ale circuitului secundar nu sînt egale. Acești curenți vor avea de asemenea frecvența sf.

Acest sistem de curenți produce în întrefier un cîmp magnetic care are două componente, un cîmp magnetic învîrtitor direct de inducție b_{2d}, care se rotește în același sens cu cîmpul magnetic învîrtitor b_1 și un cîmp magnetic învîrtitor invers b_{2i}.

Cîmpul magnetic învîrtitor direct b_{2d} se învîrtește față de rotor cu turația

$$n_{2d}=\frac{60f_2}{p}=\frac{60sf}{p}=sn_1,$$

în cîmpul magnetic învîrtitor invers b_{2i} se rotește față de rotor cu turația

$$n_{2i}=-\frac{60f_2}{p}=-\frac{60sf}{p}=-sn_1.$$

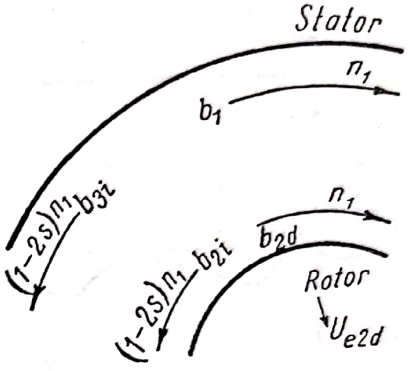


Fig. 3.57. Cîmpurile magnetice învîrtitoare într-o mașină asincronă cu circuitul secundar nesimetric.

Cîmpul învîrtitor secundar invers de inducție b_{2i} se rotește față de primar cu turația $-sn_1+n$ unde primul termen este turația cîmpului magnetic învîrtitor față de rotor, iar al doilea termen este turația rotorului față de stator. Dar turația rotorului față de stator este $n=(1-s)n_1$. Deci turația cîmpului învîrtitor rotoric invers față de stator, adică față de primar, este $-sn_1+(1-s)n_1=(1-2s)n_1$. Înfășurarea primarului împreună cu rețeaua și generatoarele constituie un circuit indus pentru cîmpul invers b_{2i}.

Fluxul magnetic al cîmpului b_{2i} va induce deci în circuitul alcătuit din înfășurarea statorică a mașinii, rețea și generatoare, un sistem simetric de tensiuni electromotoare, care admițînd că rețeaua este echilibrată va stabili un sistem simetric de curenți, care la rîndul lor vor produce un cîmp magnetic învîrtitor, avînd față de primar turația $(1-2s)n_1$.

Astfel, în aceeași mașină reală există două mașini fictive, una care are ca primar statorul, iar ca secundar rotorul mașinii reale; alta care are ca primar rotorul iar ca secundar statorul mașinii reale. Cuplul rezultant se obține făcînd suma cuplurilor celor două mașini fictive.

În cazul cînd alunecarea s este pozitivă și mai mică decît $\frac{1}{2}$, frecvența tensiunilor electromotoare și a curenților induși în circuitul format de înfășurarea statorică rețea și generatoare de către cîmpul rotoric invers este

$$f_3=(1-2s)f.$$

Pentru alunecări pozitive și mai mari decît $\frac{1}{2}$, se obține $f_3=(2s-1)f$.

Dacă însă alunecarea este egală cu $\frac{1}{2}$, atunci cîmpul magnetic secundar invers b_{2i} este fix în raport cu primarul și deci tensiunile electromotoare și curenții induși în circuitul statoric de acest cîmp sînt nule.

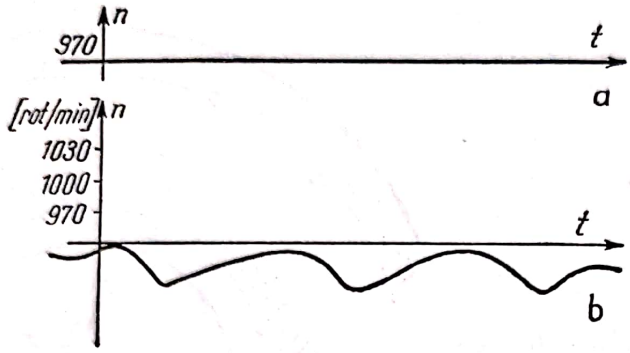


Fig. 3.58. Dependența de timp a turației:
a — pentru rotorul trifazat; *b* — pentru rotorul monofazat.

Curentul statoric fiind suma a doi curenți unul de frecvența f, celălalt de frecvența $(1-2s)f$, va prezenta bătăi, care se observă ușor la oscilograf sau chiar la orice ampermetru înseriat pe o fază a statorului.

O mașină asincronă cu circuitul secundar nesimetric nu are turația constantă, căci aceasta variază periodic după cum se poate vedea în fig. 3.58. Turația prezintă, oscilații destul de importante și ele se datoresc nesimetriei secundarului. Oricare ar fi tipul nesimetriei secundarului, datorită faptului că în întrefier există un cîmp alcătuit din suprapunerea unui cîmp magnetic învîrtitor direct și a unui cîmp magnetic învîrtitor invers, rezultă că atît cuplul cît și turația vor varia cu o pulsație egală cu viteza unghiulară relativă de rotație dintre cele două cîmpuri și anume, $\frac{2s\omega}{p}$, unde $\omega=2\pi f$, iar f este frecvența rețelei.

După cum s-a arătat mai înainte, se poate considera cîmpul invers al circuitului secundar al mașinii, drept cîmp inductor al unei alte mașini asincrone fictive, al cărei circuit indus este format de statorul mașinii considerate, rețea și generatoare.

Turația cîmpului magnetic învîrtitor produs de inductorul (adică circuitul rotoric în cazul acesta) celei de a doua mașini fictive, față de rotor, este $-sn_1$, iar turația indusului (adică circuitul statoric în cazul acesta) tot față de rotor este $-(1-s)n_1$. Alunecarea corespunzătoare a celei de a doua mașini fictive, exprimată în funcție de alunecarea mașinii reale este

$$s_i=\frac{-sn_1[-(1-s)n_1]}{-sn_1}=\frac{2s-1}{s},$$

Urmează că pentru alunecări s ale mașinii reale cuprinse între $\frac{1}{2}$ și 0, cea de a doua mașină fictivă are alunecarea s_i cuprinsă între 0 și $-\infty$, deci se află în regim de generator și creează un cuplu de frînare; pentru valori ale alunecării s cuprinse între $\frac{1}{2}$ și 1 se obțin pentru alunecarea s_i valori cuprinse între 0 și 1, deci mașina fictivă se află în re-

gim de motor și dezvoltă un cuplu motor. Dacă alunecarea s este însă egală cu $\frac{1}{2}$, atunci turația cîmpului invers b_{2i} este $\frac{1}{2} n_1$ față de secundarul mașinii reale și deci cîmpul b_{2i} este nemișcat față de primarul mașinii reale, iar cuplul corespunzător mașinii fictive va fi nul.

Cuplul electromagnetic. Efectuînd calculele, se obține pentru cuplul mașinii asincrone cu circuitul secundar nesimetric expresia [6]:

$$M = m \frac{p}{\omega} U_1^2 \frac{(1+k)\frac{R_2'}{s} + (k+\eta^2)R}{\left[R_1 + (1+k)c_1 \frac{R_2'}{s} + c_1 R\right]^2 + \left[X_k + kc_1 \left(X_k' + \frac{1}{c_3}\gamma R\right)\right]^2}, \tag{3.132}$$

unde s-a notat

$$R = \frac{\gamma X_m}{c_3^2 + \gamma^2}; \qquad c_3 = 1 + \frac{X_{\sigma 3}}{X_m};$$

$$\gamma = \frac{1}{X_m} : \frac{B_3}{2s-1}; \qquad X_k = X_{\sigma 1} + c_1 X_{\sigma 2}; \quad X_k' = X_{\sigma 2} + \frac{1}{c_3} X_{\sigma 3};$$

R_3 reprezintă suma dintre rezistența pe fază a primarului mașinii și rezistența totală a rețelei și generatoarelor, iar $X_{\sigma 3}$ reprezintă suma dintre reactanța de scăpări pe fază a primarului mașinii și reactanța totală a rețelei și generatoarelor. Dacă rețeaua este de putere infinită, atunci $R_1 = R_3$; $X_{\sigma 1} = X_{\sigma 3}$; iar k și η coeficienți prin care se ține seama de caracterul nesimetric al rotorului. Calculul acestor coeficienți este ceva mai complicat, de aceea se vor indica aici numai unele din rezultatele mai importante. Acești coeficienți sînt în cazul general al unei nesimetrii parțiale subunitari, iar în cazul limită al rotorului monofazat se obține $k=1$ și $\eta=1$.

Pentru orientare s-au reprezentat în fig. 3.59 curbele cuplurilor unei mașini asincrone cu circuitul secundar monofazat sau foarte dezechilibrat. Pentru a face reprezentarea, s-a ținut seamă de regimurile de funcționare ale mașinii fictive directe și ale mașinii fictive inverse, la diferite valori ale alunecării. S-au reprezentat: curba cuplului mașinii fictive directe M_d, curba cuplului mașinii fictive inverse M_i, curba cuplului rezultant al mașinii reale M obținut prin însumarea celor două componente.

Din examinarea curbei cuplului rezultant M al mașinii cu circuitul secundar dezechilibrat, rezultă că un fenomen caracteristic este apariția unei adînciturі în curba cuplului pentru alunecări vecine de $s=\frac{1}{2}$, adică în vecinătatea turației egale cu jumătatea turației de sincronism. De asemenea, din fig. 3.59 se vede că dacă la mașina normală punctul de funcționare la cuplul rezistent M_r este în punctul a pe curba cuplului, la mașina cu circuitul rotoric dezechilibrat, dacă dezechilibrul circuitului rotoric se produce ca urmare a unei întreruperi în circuitul rotorului în

timpul funcționării normale, alunecarea crește și punctul de funcționare pentru același cuplu rezistent se deplasează în b. Dacă pornirea se face din repaus iar cuplul minim în cazul circuitului rotoric dezechilibrat este mai mic decît cuplul rezistent sau dacă este negativ, atunci mașina ajunge să funcționeze stabil în punctul c și nu mai poate ajunge în apropierea turației normale. Astfel, un fenomen caracteristic mașinilor, cu circuitul secundar dezechilibrat, este că aceste mașini după pornire rămîn la o funcționare stabilă în vecinătatea jumătății turației de sincronism și nu ajung la turația normală.

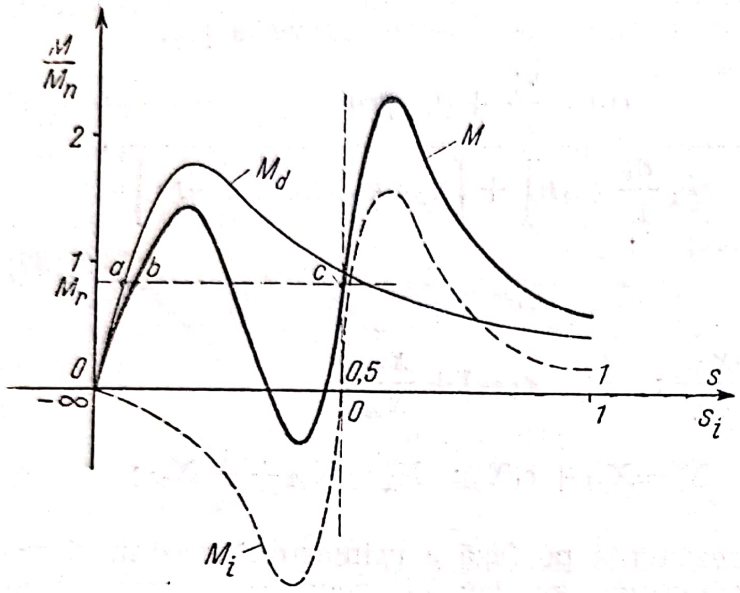


Fig. 3.59. Cuplurile mașinii asincrone cu circuitul secundar nesimetric (monofazat sau puternic dezechilibrat):
M_d — cuplul mașinii directe; M_i — cuplul mașinii inverse; M — cuplul rezultant.

În această funcționare alunecarea este $s=\frac{1}{2}+\alpha$ unde α este o mărime subunitară foarte mică. Frecvența curenților induși în stator de cîmpul magnetic invers este $f_3=(2s-1)f=2\alpha f$ și, cum α este foarte mic rezultă că și frecvența f_3 este foarte scăzută, de aproximativ 2...3 Hz. Acest curent cu frecvența de 2...3 Hz, care apare pe rețea datorită dezechilibrului rotoric, produce oscilații vizibile ale ampermetrelor din circuitul statoric și ale lămpilor conectate în paralel pe aceeași rețea.

Dacă dezechilibrul circuitului rotoric este datorit întreruperii uneia sau a cîtorva bare ale coliviei rotorice, dezechilibrul are un caracter parțial și atunci $k<1$ și $\eta<1$. Curbele cuplurilor mașinii fictive directe, mașinii fictive inverse și mașinii reale sînt reprezentate în fig. 3.60. Se vede că în acest caz de dezechilibru parțial al circuitului rotoric, adîncitura din curba cuplului există, dar este mai puțin pronunțată, iar cuplul rezultant nu mai este negativ. Din examinarea figurilor 3.59 și 3.60 rezultă că, în cazul în care circuitul rotoric este monofazat sau foarte dezechilibrat, cuplul fiind negativ în apropiere de turația $\frac{1}{2}n_1$, motorul nu poate ajunge după pornire în apropiere de turația normală, chiar dacă cuplul rezistent este nul. Dacă însă dezechilibrul circuitului rotoric este parțial, atunci cuplul nu mai devine negativ; cînd cuplul rezistent nu este prea mare (de exemplu M_{r2} în fig. 3.60), motorul poate ajunge în apropiere de turația normală, după pornire.

Adîncitura din curba cuplului produsă de dezechilibrul circuitului

rotoric nu trebuie confundată cu adîncitura produsă de armonicile superioare ale cîmpului magnetic, care există separat şi dau efecte similare. Cuplurile produse de armonicile superioare ale cîmpului magnetic sînt determinate de construcţia maşinii şi se iau măsuri constructive ca să aibă valori cît mai reduse.

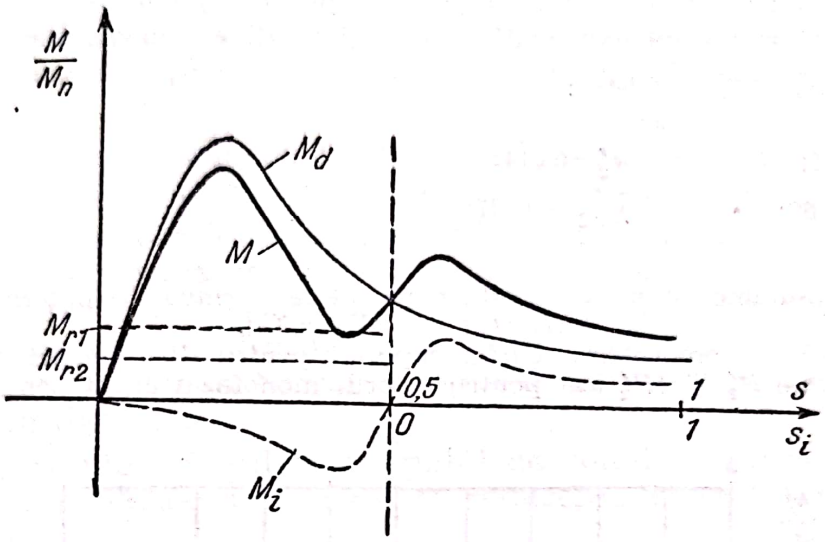


Fig. 3.60. Cuplurile maşinii asincrone cu circuitul secundar nesimetric şi anume, parţial dezechilibrat: M_d — cuplul maşinii fictive directe; M_i — cuplul maşinii fictive inverse; M — cuplul rezultant. Pentru cuplul rezistent M_{r1} nu se ajunge la turaţia normală, ci la $\frac{1}{2} n_1$; pentru cuplul rezistent M_{r2} se ajunge la turaţia normală.

Încărcarea maşinii asincrone cu circuitul rotoric monofazat. Pentru a stabili sarcina admisibilă a motorului cu circuitul rotoric monofazat se poate admite că trebuie să se îndeplinească una din următoarele două condiţii:

pierderile totale din cuprul statorului şi rotorului nu trebuie să depăşească pierderile totale în regim normal de funcţionare;

curentul nu trebuie să depăşească valoarea nominală în nici una din fazele statorului sau rotorului.

Calculul arată că pentru a îndeplini prima condiţie este necesar ca sarcina motorului să reprezinte sub 0,7 din sarcina nominală, iar pentru a îndeplini a doua condiţie este necesar ca sarcina motorului să reprezinte sub 0,57 din sarcina nominală. Se poate admite ca acceptabilă încărcarea după prima condiţie, deşi atunci curenţii de fază vor depăşi valoarea nominală, deoarece motorul cu o fază întreruptă nu este lăsat să funcţioneze decît un timp scurt şi în caz de extremă necesitate, iar în acest interval de timp creşterea pierderilor pe două din fazele rotorului este compensată de absenţa pierderilor din faza întreruptă.

În general, trebuie să se evite pe cît posibil funcţionarea motoarelor asincrone cu o fază întreruptă la rotor.

În cazul coliviei rotorice cu bare întrerupte fenomenele sînt similare dar, dacă numărul de bare întrerupte este mic, fenomenele sînt mult mai puțin pronunțate și de aceea defectul este mai greu de constatat. Totuși funcționarea motoarelor cu acest tip de defecțiune trebuie de asemenea pe cît posibil evitată.

Exemplu. Se dă un motor cu următoarele date [5]:
P_n=155 kW; n_1=1 500 rot/min; U_n=220 V pe fază; f=50 Hz.

Parametrii motorului exprimați în unități relative și anume, raportate la impedanța nominală $Z_n=\frac{U_n}{I_n}$ sînt:

$\widetilde{R}_1$=0,0151; $\widetilde{R}'_2$=0,014;

$\widetilde{X}_{\sigma 1}$=0,0768; $\widetilde{X}'_{\sigma 2}$=0,087;

$\widetilde{X}_m$=3,25.

Se va presupune că motorul este conectat la o rețea de putere infinită, deci

$$R_3=R_1; \qquad X_{\sigma 3}=X_{\sigma 1}.$$

Se cere să se construiască curba cuplului pentru două valori ale rezistenței rotorice și anume R'_2 și $4R'_2$ atît pentru rotorul monofazat cît și pentru rotorul trifazat.

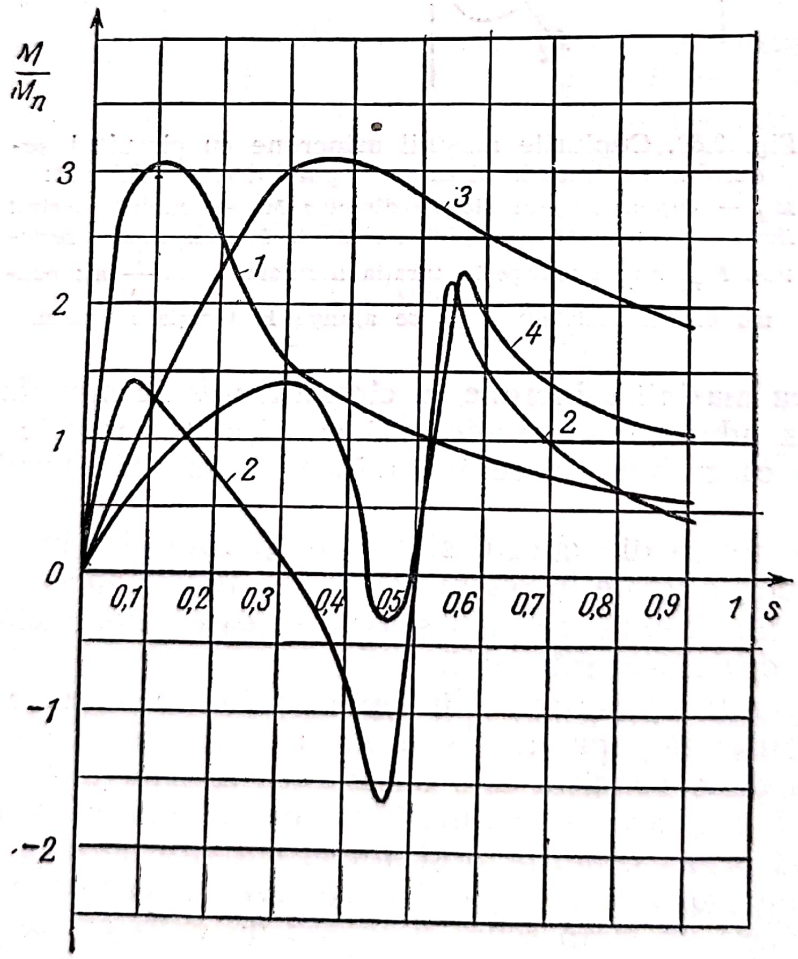


Fig. 3.61. Curbele reprezentative ale cuplului:
rotor trifazat pentru R'_2 curba *1*; rotor trifazat pentru $4R'_2$ curba *3*; rotor monofazat pentru R'_2 curba *2*; rotor monofazat pentru $4R'_2$ curba *4*.

Scanned with OKEN Scanner

În acest caz $k=1$ și $\eta=1$ și se poate utiliza expresia 3.132. Curbele obținute sînt reprezentate în fig. 3.61.

Din curbele trasate în fig. 3.61 se vede că la motorul cu rotorul monofazat, în zona alunecărilor mici, la un cuplu rezistent aproximativ egal cu cel nominal, alunecarea crește și devine aproximativ dublă față de aceea a motorului cu rotorul trifazat.

3.12.8. Utilizarea coliviei rotorice cu inele de conexiune întrerupte pentru îmbunătățirea caracteristicilor de pornire

Una din problemele de bază, în utilizarea motoarelor asincrone cu rotorul cu colivie, este îmbunătățirea caracteristicilor de pornire.

Unul din mijloacele de îmbunătățire a performanțelor de pornire îl constituie întreruperea inelelor de conexiune ale coliviei rotorice [40]. Inelele se întrerup de fiecare parte a rotorului, la distanță de cîte un pas polar, iar punctele de întrerupere ale celor două inele sînt decalate între ele cu cîte un pas polar. Se obține tipul de colivie care este reprezentată desfășurat în fig. 3.62.

Un dezavantaj al utilizării tipului de colivie descris este reducerea cuplurilor armonicilor superioare și reducerea efectului neuniformității întrefierului.

Pierderile în colivia cu inele întrerupte oscilează la funcționarea în sarcină între două valori limită: o limită este egală cu pierderile prin efect Joule-Lenz cînd inelele nu sînt întrerupte, cealaltă limită este egală cu triplul acestei valori. După întreruperea inelelor de conexiune, pierderile în rotor devin deci egale aproximativ cu dublul pierderilor care se produc cînd inelele nu sînt întrerupte.

Întreruperea inelelor de conexiune are drept rezultat reducerea curentului de pornire, dar totodată se micșorează și cuplul de pornire. Totuși reducerea curentului de pornire este mai pronunțată decît reducerea cuplului de pornire, astfel încît raportul dintre cuplul de pornire și curentul de pornire față de cazul cînd inelele nu sînt întrerupte crește cu 16,5%.

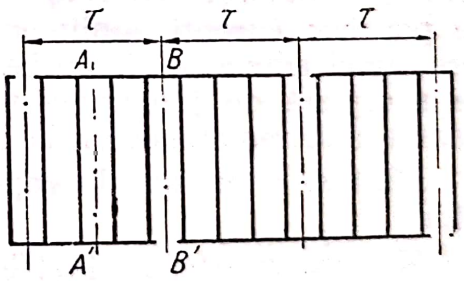


Fig. 3.62. Colivie cu inele de conexiune întrerupte, cu dezechilibru electric.

Cuplul maxim al rotorului scade cu aproximativ 22%. După cum s-a menționat, întreruperea inelelor de conexiune are drept rezultat reducerea cuplurilor armonicilor superioare. În adevăr, rezistența unei bare a coliviei incluzînd și rezistența inelului de conexiune este dată de formula cunoscută,

$$R_{2\nu} = R_b + \frac{R_i}{2\sin^2\frac{\alpha_\nu}{2}}; \qquad \alpha_\nu = \nu\frac{2\pi p}{Z_2}, \tag{3.133}$$

unde s-a notat: $R_{2\nu}$ — rezistența rotorului pentru armonica ν a statorului; R_b — rezistența unei bare; R_i — rezistența unui segment de inel cuprins între două bare vecine; α_ν — unghiul electric dintre două bare vecine calculat pentru armonica ν; ν — ordinul armonicii; Z_2 — numărul de bare ale coliviei.

Din examinarea acestei relații se vede că pentru o armonică se poate obține o rezistență a rotorului mult mai mare decît pentru armonica fundamentală. Ca urmare, se poate obține o reducere importantă a cuplurilor date de armonicile superioare față de cuplul dat de armonica fundamentală.

Din relația 3.133 rezultă că întreruperea inelelor de conexiune duce la mărirea rezistenței rotorului și deci la micșorarea curentului de pornire. Întreruperea inelelor duce de asemenea la mărirea reactanței de scăpări a rotorului. Mărirea rezistenței rotorului ar trebui să aibă ca urmare mărirea cuplului, afară de cazul că mărirea rezistenței nu este exagerată. Totuși nu are loc o mărire a cuplului de pornire din cauza măririi reactanței de scăpări și din cauza dezechilibrului electric al rotorului.

În urma întreruperilor practicate la inele, rotorul devine dezechilibrat electric. Astfel, examinînd fig. 3.62 și luînd în considerație intervalul ocupat de un dublu pas polar, se constată că există bare care formează spire care înlănțuie polul (este cazul barelor așezate simetric față de axa AA') și există bare care nu pot forma spire care să înlănțuie polul (este cazul barelor care sînt așezate simetric față de axa BB'). De aceea rotorul prezintă impedanțe diferite după cele două axe AA' și BB', deci este un rotor parțial dezechilibrat electric. Din acest motiv la motorul cu inelele coliviei întrerupte, se întîlnesc fenomenele arătate în general la motoarele cu rotor nesimetric: o oarecare micșorare a cuplului de pornire; curenți suplimentari în stator de frecvența $(2s—1)f$; prezența unei adînciturі în curba cuplului în funcție de alunecare la o turație apropiată de jumătatea turației de sincronism; micșorarea cuplului maxim; mărirea alunecării la cuplul de sarcină nominală.

Mărirea alunecării la cuplul nominal duce la mărirea pierderilor în rotor.

Mărirea rezistenței inelelor de conexiune prin efectuarea de întreruperi, fără a provoca dezechilibrul electric al înfășurării rotorului, se poate realiza utilizînd un număr mai mare de întreruperi efectuate la un interval convenabil ales.

În fig. 3.63 se arată o colivie cu inelele de conexiune întrerupte, la care nu se produce dezechilibru electric. Se observă că numărul de întreruperi din fig. 3.63, *a* este dublu față de cel din fig. 3.62, deci în fig. 3.63 sînt în total $4p$ întreruperi.

Comportarea coliviei din fig. 3.63, *b* este echivalentă cu comportarea coliviei din fig. 3.63, *a*. Coliviile din fig. 3.63 nu prezintă dezechilibru electric, deoarece toate barele de pe un dublu pas polar au poziții simetrice față de axele AA' și BB', indicate în fig. 3.62.

Scanned with OKEN Scanner

La motoarele asincrone de serie este convenabil să se facă întreruperea la un singur inel, deci numai de o parte a rotorului, deoarece accesul la cealaltă parte a rotorului este îngreunată de prezența ventilatorului. Întreruperea inelelor se poate face cu o freză foarte subțire sau cu o pînză de ferestrău. Este util ca după această operație să se verifice echilibrarea mecanică a rotorului.

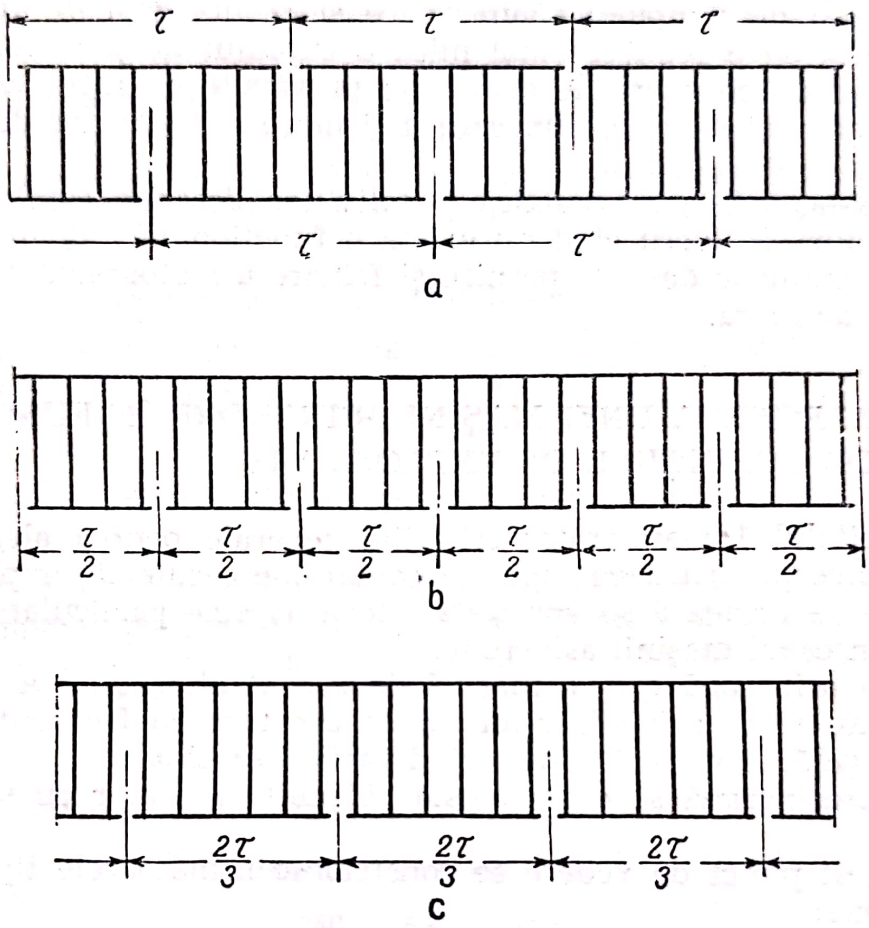


Fig. 3.63. Colivii cu inele de conexiune întrerupte, fără dezechilibru electric.

În fig. 3.63, *c* este reprezentată o colivie cu trei întreruperi la fiecare pereche de poli, deci în total $3p$ întreruperi. Dacă numărul de perechi de poli p este par, se poate realiza dispunerea simetrică a celor $3p$ întreruperi de ambele părți ale rotorului, întreruperile de la un inel fiind decalate cu $\frac{2\tau}{3}$ față de întreruperile de la celălalt inel.

Utilizarea tipurilor de colivie cu întreruperea inelelor descrise mai înainte (fig. 3.63) a arătat îmbunătățirea condițiilor de pornire și anume, raportul dintre cuplul și curentul de pornire a crescut de 2,5 . . . 3 ori, față de cazul cînd inelele coliviei nu erau întrerupte.

Condițiile de funcționare a mașinii la cuplul nominal au fost însă înrăutățite, alunecarea a crescut iar factorul de putere a scăzut cu 10—20%.

Este util de adăugat că întreruperea inelelor coliviei nu duce în realitate la întreruperea completă a legăturii dintre barele vecine, ci doar la mărirea impedanței de legătură, deoarece conexiunea între barele vecine este asigurată în continuare prin tolele rotorului, barele coliviilor nefiind izolate.

Din cele expuse, rezultă că utilizarea coliviilor cu inele de conexiune cu întreruperi convenabil alese (fig. 3.63), permite reducerea cuplurilor parazite date de armonicile superioare și reducerea curentului de pornire, însoțită de o reducere mai mică a cuplului de pornire.

În funcționare, mașinile asincrone prevăzute cu astfel de colivii au însă pierderi mai mari, o alunecare mai mare și un factor de putere mai scăzut.

De aceea, aplicarea practică a coliviilor descrise este rațională în acele regimuri de lucru cînd nu există o funcționare îndelungată în sarcină, iar regimurile dese de pornire și frînare a motoarelor caracterizează acel regim de lucru.

3.13. ALEGEREA UNEI MAȘINI ASINCRONE ÎN FUNCȚIE DE CONDIȚIILE DE EXPLOATARE

În capitolul 1 s-au arătat criteriile generale pentru alegerea mașinilor electrice pentru a corespunde condițiilor cerute de exploatare.

În cele ce urmează se vor trata cîteva aspecte particulare în această problemă în cazul mașinii asincrone.

Mașina asincronă este o mașină de curent alternativ, a cărei viteză de rotație nu se menține într-un raport constant cu frecvența rețelei la care este legată, ci variază atunci cînd variază sarcina.

Mașina asincronă se construiește obișnuit ca motor cu și fără inele de contact.

Din acest punct de vedere se construiesc următoarele tipuri de mașini asincrone:

mașini asincrone fără colector

motor asincron cu colivie simplă,

motor cu bare înalte,

motor cu dublă colivie,

motor cu rotorul bobinat (cu inele de contact),

motor cu demaror centrifugal (motoarele monofazate la care faza auxiliară de pornire se decuplează cînd rotorul intră în turație, de către un dispozitiv centrifugal),

motor asincron sincronizat;

mașini asincrone cu colector (aceasta este o mașină electrică al cărui rotor are o înfășurare de tip de curent continuu, legată la colector).

Mai utilizate sînt următoarele mașini asincrone cu colector:

motorul monofazat serie cu colector;

motorul monofazat cu repulsie;

motorul trifazat derivație cu colector;

motorul trifazat serie cu colector;

Scanned with OKEN Scanner

motorul trifazat cu colector cu alimentare prin rotor (motor Schrage-Richter);

motor asincron compensat.

În continuare se vor trata mașinile asincrone uzuale, care sînt de fapt motoarele asincrone fără colector cu rotorul tip colivie și motoarele asincrone cu rotorul bobinat.

Motoarele electrice asincrone se construiesc pînă la puterea de 10 000 kW.

Pentru limitarea tipurilor de mașini electrice, toate țările au căutat să standardizeze diferite game de puteri pe turații.

Această activitate de standardizare se coordonează internațional. În România s-au standardizat prin STAS 881—67 motoarele asincrone de la 0,06 la 132 kW.

Puterile nominale, în kW, sînt următoarele:

0,06	0,09	0,12	0,18	0,25	0,37	0,55	
0,75	1,1	1,5	2,2	3	4	5,5	7,5
11	15	18,5	22	30	(37)	40	45
55	75	90	110	132.			

Turațiile nominale la frecvențele de 50 Hz și 60 Hz sînt date în tabelul 3.4.

Tensiunile nominale standardizate sînt date în tabelul 3.5.

De asemenea prin STAS 6587—68 se stabilesc puterile, tensiunile și turațiile nominale pentru motoarele electrice trifazate, din gama 160 la 1 000 kW, și anume:

puteri nominale, în kW

160; 200; 250; 315; 400; 500; 630 800 1 000

tensiuni nominale, în V

380 660 6 000.

Turații sincrone nominale la 50 Hz și 60 Hz sînt precizate în tabelul 3.6.

În afara gamei standardizate, în România se execută motoare asincrone la comenzi speciale pînă la puterea de 5 000 kW.

În gamele standardizate de puteri 0,06—132 kW și 160—1 000 kW, motoarele se execută cu construcție închisă și antiexplozivă.

Tabelul 3.4

Turații nominale standardizate pentru motoare

Frecvența Hz	Turația, rot/min					
50	3 000	1 500	1 000	750	600	500
60	3 600	1 800	1 200	900	720	600

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 3.5

Tensiuni standardizate pentru motoare

Tensiunea nominală	Tensiunea reţelei	Motor cu rotorul în scurtcircuit (colivie)		Motoare cu rotorul bobinat	
		Conexiunea	Pornire	Conexiunea	Pornire
380 660	380 660	Y	Y/Δ sau directă	Y	Prin reostat rotoric

Tabelul 3.6

Turaţii sincrone nominale

Frecvenţa Hz	Turaţia rot/min					
50	3 000	1 500	1 000	750	600	500
60	3 600	1 800	1 200	900	720	600

În afara celor expuse mai sus şi a celor arătate la capitolul 1, la alegerea unui motor asincron trebuie să se ţină seama de poziţia de funcţionare în exploatare.

Tipurile constructive, în care pot fi executate maşinile electrice, sînt împărţite în grupe indicate în tabelul 3.7.

Tabelul 3.7

Tipuri constructive de motoare asincrone

Grupele tipurilor constructive ale maşinilor electrice rotative	Simbolul grupei
Maşini cu axă orizontală, fără lagăre	L
Maşini cu axă orizontală şi lagăre în scuturi	S
Maşini cu axa orizontală, cu lagăre în scuturi şi lagăre picior separate	SP
Maşini cu axa orizontală şi cu lagăre picior	P
Maşini cu axa orizontală şi fixare prin flanşă	F
Maşini cu axa verticală	V
Maşini cu axa verticală, tip hidrogenerator	VH
Maşini cu axa verticală şi fixare prin flanşă şi inel	VF
Agregate cu două maşini electrice	A

Maşinile fără lagăre, care formează grupa cu simbolul L, sînt maşini al căror rotor se calează pe arborele maşinii de antrenare cu care se cuplează sau al căror arbore este terminat sub formă de flanşă, pentru a se fixa astfel de arborele maşinii de antrenare. Statorul se execută cu sau fără tălpi de prindere, în ultimul caz montarea făcîndu-se în consolă.

Acest tip constructiv se întîlneşte la excitatoarele în construcţie monobloc cu generatoarele respective, la motoarele electrice înglobate (de exemplu pentru maşini-unelte, pentru compresoare etc.).

Scanned with OKEN Scanner

Cea mai largă utilizare o au mașinile cu axa orizontală și lagărele în scuturi, care formează grupa cu simbol S. Aceste mașini au fie un singur scut port-lagăr, sub formă de flanșă pentru a se fixa rigid de arborele mașinii cu care se cuplează (situația frecvent întîlnită la generatoarele mari cuplate cu motoare Diesel), fie două scuturi portlagăr (situația cea mai uzuală la construcția mașinilor electrice). În funcție de numărul scuturilor portlagăr și de poziția tălpilor de prindere, mașinile din această categorie se subdivid în 7 grupe a căror specificare este arătată în tabelul 3.8.

Tabelul 3.8

Mașini cu axa orizontală și lagăre în scuturi

Simbol	Carcasa	Lagăre	Arbore
S1	Fără tălpi	Cu un singur scut port-lagăr	Arborele terminat în formă de flanșă
S2	Cu tălpi	Cu două scuturi port-lagăr	Arborele cu cap liber
S3			Fără cap de arbore
S4			Arborele cu cap liber
S5	Cu tălpi pentru fixare pe tavan		Capul liber al arborelui în dreapta
S6	Cu tălpi pentru fixare pe un perete vertical		Capul liber al arborelui în stînga
S7			

Grupa constructivă SP cu axa orizontală, avînd rotorul susținut cu ajutorul scuturilor portlagăr și al lagărelor picior separate, cuprinde patru tipuri constructive indicate în tabelul 3.9.

Tabelul 3.9

Mașini cu axa orizontală, cu lagăre în scuturi și lagăre picior separat

Simbol	Scut port—lagăr	Lagăr picior	Placa de fundație
SP 1 SP 2	două	unul	nu
SP 3	unul		da
SP 4	două	două	

Grupa P cu axă orizontală, avînd rotorul susținut cu ajutorul lagărelor picior, este indicată în tabelul 3.10.

Tabelul 3.10

Mașini cu axa orizontală și cu lagăre picior

Simbol	Lagăr picior	Arbore	Fundație
P1	1	Arbore terminat în formă de flanșă	Lagărul picior și statorul se fixează pe fundația mașinii cu care se cuplează
P2			Lagărul picior și statorul se fixează pe plăci de sprijin îngropate separat în fundație de beton sau piatră
P3			Cu placă de fundație comună pentru lagărul picior și stator
P4			Ca și la P3, avînd placă de fundație cu un loc liber pentru un lagăr picior al mașinii cu care se cuplează
P5	2	Cu cap de arbore liber	Lagărele picior și statorul se fixează pe fundația mașinii cu care se cuplează
P6			Lagărele picior și statorul se fixează pe plăci de sprijin îngropate separat în fundația de beton
P7		Fără cap de arbore liber	
P8			Cu placă de fundație comună pentru lagărele picior și stator
P9	3	Cu capul de arbore liber în două lagăre picior	Placă de fundație comună pentru două lagăre și stator, lagărul suplimentar fiind separat și prevăzut cu talpă de fixare în plăci de sprijin
P10			Placă de fundație comună pentru stator și cele trei lagăre picior.

Mașinile cu prindere frontală alcătuiesc categorii separate. Cele cu axa orizontală formează grupa F (tabelul 3.11), iar cele cu axa verticală grupa VF (tabelul 3.12).

Scanned with OKEN Scanner

Mașini cu axa orizontală și fixare prin flanșă *Tabelul 3.11*

Simbol	Numărul scuturilor port lagăr	Suprafața de fixare se află la
F 1	1	Carcasă (de partea antrenării)
F 2	2	Scutul din partea antrenării
F 3		Scutul din partea antrenării, de tipul cu flanșă de fixare
F 4		Carcasă sau scut sub formă de inel de fixare în partea antrenării, prinderea făcîndu-se dinspre partea antrenării
F 5		Carcasă sau scut sub formă de inel de fixare în partea antrenării, prinderea făcîndu-se dinspre scutul suport
F 6		Carcasă sau scut sub formă de inel de partea scutului suport, prinderea făcîndu-se dinspre partea antrenării
F 7		Carcasă sau scut sub formă de inel de partea scutului suport, prinderea făcîndu-se dinspre partea opusă antrenării

Mașini cu axa verticală și fixare prin flanșă sau inel *Tabelul 3.12*

Simbol	Numărul scuturilor portlagăr	Suprafața de fixare			Prinderea dinspre partea	Capătul liber al arborelui dirijat în
		Prevăzută la	Sub forma	În partea de		
VF 1	1	carcasa	plană	jos	antrenării	jos
VF 2				sus		sus
VF 3	2	scutul de partea antrenării		jos		jos
VF 4				sus		sus
VF 5			flanșă	jos		jos
VF 6				sus		sus
VF 7		carcasa sau scutul de partea antrenării	inel	jos		jos
VF 8				sus		sus
VF 9				jos	opusă antrenării	jos
VF 10				sus		sus
VF 11		carcasa sau scutul de partea opusă antrenării		sus		jos
VF 12				jos		sus
VF 13				sus		jos
VF 14				jos		sus

Scanned with OKEN Scanner

Mașinile verticale, fixate prin tălpi, formează grupa V (tabelul 3.13).

Tabelul 3.13

Mașini cu axa verticală

Simbol	Prindere	Capătul de arbore dirijat spre
V 1	de tălpile carcasei	jos
V 2		sus
V 3	pe un suport în formă de cilindru al scutului inferior	jos

Pot exista și unele construcții combinate a acestor tipuri de mașini electrice.

3.14. PUNEREA ÎN FUNCȚIUNE A MOTOARELOR ELECTRICE ASINCRONE

3.14.1. Probleme generale

Uzina producătoare expediază motoarele în ambalaje executate solid, pentru a rezista în timpul transportului și corespunzătoare pentru a evita pătrunderea umezelii în electromotor.

Dacă motorul nu se montează imediat pe fundament, atunci el nu se desface din ambalaj și se păstrează în ambalajul original al uzinei furnizoare.

Păstrarea trebuie astfel asigurată încît motorul să nu fie supus înghețului sau umezelii. În timp de iarnă, motorul se va păstra într-o încăpere încălzită la minimum +3°C. În timp de vară, se permite păstrarea motoarelor ambalate sub șoproane însă pe un timp limitat; șopronul trebuie să protejeze motoarele contra ploii. Încăperile unde se păstrează motoarele nu trebuie să aibă vapori oxidanți sau alți vapori sau gaze, care să influențeze defavorabil asupra detaliilor motorului, a conductoarelor de curent sau asupra izolației elementelor.

Desfacerea ambalajului se va face în aceeași încăpere unde va fi instalat motorul.

La desfacerea lăzii (ambalajului), nu sînt admise lovituri puternice de ciocan și introducerea corpurilor metalice în interiorul lăzii (de exemplu, rângi introduse în interiorul lăzii care ar putea atinge mașina).

Dacă în încăpere lipsesc mijloacele mecanizate de transport și de ridicare (macara, pod rulant etc.), atunci transportarea motorului pe locul de montaj se va face cu ajutorul unui cărucior, nepermițîndu-se transportarea și rularea lui pe podea sau pămînt, cu ajutorul rolelor sau țevilor.

Scanned with OKEN Scanner

Dacă motorul se introduce pe timp de iarnă în încăperea în care el este destinat să funcționeze, atunci nu se desface ambalajul imediat, pentru ca motorul să se încălzească și să capete temperatura mediului ambiant; altfel, la despachetare se poate produce condensarea apei pe părțile motorului, umezindu-l.

Dacă uzina furnizoare trimite motorul în stare complet montat, după despachetare nu se demontează, ci se instalează pe fundație în starea în care a fost trimis.

La despachetarea motorului trebuie evitată atingerea părților șlefuite ale motorului (capătul arborelui), dar dacă totuși aceasta trebuie neapărat făcut, se protejează acoperindu-le cu piele și peste aceasta cu carton obișnuit.

La montarea mașinii se va îndepărta unsoarea de pe părțile metalice cu ajutorul cîrpelor îmbibate în petrol. În acest caz trebuie urmărit cu grijă ca petrolul să nu pătrundă în părțile izolate a mașinii.

3.14.2. **Montajul**

Placa de fundație pe care urmează a fi instalat motorul trebuie să fie solidă și să nu permită vibrații.

Electromotoarele instalate trebuie apărate contra prafului conducător de electricitate și în special contra pulberii metalice. De aceea, în imediata vecinătate a motorului nu sînt permise depozitările de nici un fel de deșeuri. Curățirea încăperii unde este instalat motorul trebuie să se facă cît se poate de des stropindu-se podeaua cu apă înainte de fiecare măturare.

Încăperea trebuie să fie ventilată, pentru curățirea și răcirea maximă a aerului (în cazul motoarelor foarte mari). Temperatura mediului ambiant nu poate fi admisă mai mare de +40°C pentru mașinile la care nu s-au prevăzut condiții speciale în comanda beneficiarului, în care caz temperatura mediului ambiant va fi cea prevăzută în contract.

Limita inferioară a temperaturii la care mașina poate fi lăsată în stare de repaus un timp mai îndelungat, nu trebuie să fie mai mică de +3°C. În cazul în care condițiile de exploatare conduc la nerespectarea limitei de +3°C, la repunerea în funcțiune se iau măsuri speciale de revizie a mașinii electrice.

Înainte de pornire, mașina va fi verificată din punct de vedere mecanic și în special dacă arborele se învîrtește ușor, pentru ca să se stabilească că mașina nu a suferit deteriorări în timpul transportului.

Legarea electromotoarelor împreună cu aparatele lor la rețea se face ținîndu-se seama de schema de conexiuni.

Cînd mașinile sînt montate pe glisiere, se vor prevedea cabluri de alimentare suficient de lungi și flexibile, care nu vor exercita nici un efort asupra plăcii cu bornele de legătură.

Se mai iau următoarele măsuri cu ocazia montajului mașinii electrice:

electromotoarele trebuie neapărat legate la pămînt, în conformitate

Scanned with OKEN Scanner

cu prescripțiile în vigoare, ținînd bineînțeles seama de specificul instalației din care fac parte;

electromotoarele se vor proteja contra curenților a căror intensitate depășește pe cea indicată pe plăcuța indicatoare, ținînd seama de condițiile în care se face pornirea;

la transmisia prin curea trapezoidală se verifică alinierea celor două șaibe în așa fel ca flancurile curelei să se așeze corect în canalul conic al celor două șaibe pentru a evita uzura prematură a curelei și solicitarea lagărelor celor două mașini cuplate.

La transmisia prin curea lată, alinierea șaibelor de transport se va face în așa fel încît cureaua să fie mai apropiată de motor spre a evita, în timpul funcționării în sarcină, eforturi suplimentare în arborele motorului.

În situațiile descrise, alegerea roților de transmisie se face ținînd seama că unghiul sectorului pe care calcă cureaua pe roată să fie mai mici de 160° pentru a evita uzura prematură a curelelor datorită patinărilor.

Curelele nu trebuie să fie prea întinse, pentru a nu dăuna duratei de funcționare a lagărelor de alunecare sau rulmenților.

În cazul cuplării directe, trebuie stabilită o aliniere perfectă între axul motorului și axul mașinii antrenate. Cuplarea trebuie să se facă cu multă grijă.

Mașina antrenată nu trebuie să transmită nici un fel de smucituri sau eforturi axiale asupra motorului.

3.14.3. **Pregătirea pentru pornirea motorului**

După instalare, înainte de a fi pornit, motorul va fi supus unei revizii amănunțite.

Trebuie verificată strîngerea tuturor pieselor de fixare. Trebuie controlată lipsa corpurilor străine în interiorul mașinii. Dacă mașinile au rulmenți cu bile sau role, atunci ele se trimit cu rulmenții unși gata, pentru exploatare. Cu toate acestea, capacele rulmenților trebuie scoase și verificată unsoarea, dacă în urma păstrării îndelungate sau transportului motorului nu s-a întărit și nu și-a pierdut proprietățile.

Dacă intervalul de timp între livrare și punerea motorului în exploatare este îndelungat (mai mult de 6 luni), atunci unsoarea se îndepărtează, se spală rulmenții în mod atent cu benzină (evitînd în orice caz spălarea cu petrol) și se șterg. Spălarea se face cu benzină apoi se suflă cu aer.

După curățire, se șterg din nou, umplînd cu unsoare 1/3—1/2 din volumul spațiului liber al casetei rulmenților.

Lubrifiantul pentru rulmenți cu bile și cu role trebuie să îndeplinească următoarele condiții:

punct de picurare 130 la 140°C;

nu se admite prezența urmelor de apă;

nu se admite de asemenea prezența corpurilor solide în unsoare;

Scanned with OKEN Scanner

culoarea lubrifianților poate fi diferită, variind de la galben deschis pînă la maron deschis;

stratul subțire al lubrifianților trebuie să fie transparent;

structura lubrifiantului trebuie să fie omogenă, fără cocoloașe și întărituri, să nu fie fibroasă (la desfacerea degetelor firele trebuie să se rupă scurt, fără să producă fire lungi).

Intervalul de timp după care este necesară curățirea și schimbarea lubrifianților se determină prin condițiile de lucru, utilizarea zilnică a mașinii, temperatura mediului ambiant etc.

În cazul condițiilor normale de lucru, adică 8 ore lucru la temperatura obișnuită (maximum +40°C), cantitatea de lubrifianți este suficientă pentru un timp de 6 luni pînă la 1 an. Chiar în cazul solicitărilor mai ușoare, timp de funcționare mai scurt etc., se recomandă curățirea și schimbarea lubrifianților rulmenților după același interval de timp. Este strict interzisă ștergerea pieselor interioare ale mașinii cu ajutorul cîrpelor sau al cîrpelor înfășurate pe bețe.

Se pot șterge cu cîrpe numai părțile exterioare ale mașinii și acele părți care se văd bine.

La motoarele cu inele de contact, inelele și periile trebuie revizuite în ceea ce privește:

— curățenia suprafeței inelelor;

— contactul pe toată suprafața între perii și inelele de contact;

— presiunea periilor, care trebuie să fie de 180 gf/cm^2 (se verifică cu un dinamometru).

Dacă contactul între perii și inele nu este perfect, periile trebuie șlefuite cu hîrtie abrazivă. În timpul șlefuirii, fața abrazivă a hîrtiei este așezată înspre perie și aceasta este apăsată pe inel de presiunea ei normală, adică de presiunea arcului port-perie. Funcționarea normală este asigurată prin respectarea presiunii indicate mai sus.

O presiune prea mică poate conduce la apariția de scîntei și, ca urmare, la distrugerea periilor și inelelor. O presiune exagerată provoacă uzura rapidă a periilor.

Între portperie și inel trebuie să existe un joc de 3 mm, care se va verifica.

La legarea la rețea trebuie să nu se uite că, în afară de ieșirile statorului, motoarele cu inele de contact au și trei conexiuni terminale pentru înfășurarea rotorului.

Toate ieșirile trebuie conectate după cum se arată în fig. 3.64.

Înaintea primei porniri, motorul asincron se supune următoarelor probe:

— verificarea documentației de montaj, a documentației motorului și a prescripțiilor date de uzina furnizoare pentru probe;

— măsurarea intrefierului (la toate motoarele cu $U_n > 1$ kV și la motoarele cu $U_n = 0{,}4$ kV care antrenează mecanisme importante), în cazul mașinilor deschise;

— măsurarea rezistențelor de izolație a înfășurărilor, înainte și după uscare;

Scanned with OKEN Scanner

— măsurarea umidității izolației înfășurării, stabilindu-se coeficientul de absorbție a înfășurării statorice prin metoda R_{60}/R_{15};

— măsurarea rezistenței la izolație a motoarelor cu lagărul izolat constructiv;

— măsurarea rezistenței de izolație a înfășurărilor rotorice față de corp;

— încercarea cu tensiune alternativă mărită, cu frecvența de 50 Hz, a bobinelor statorice;

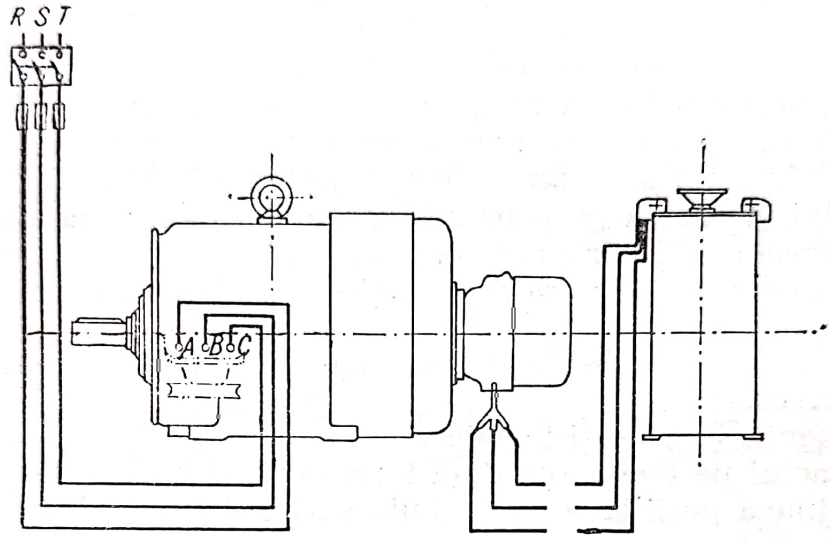


Fig. 3.64. Legarea motoarelor cu inele de contact.

— încercarea cu tensiune alternativă mărită, cu frecvență de 50 Hz, a bobinelor rotorice la motorul cu rotor bobinat;

— încercarea cu tensiune mărită alternativă a reostatelor de reglaj, de pornire sau a rezistențelor de stingere a cîmpului, care fac parte din instalația motoarelor;

— măsurarea rezistențelor înfășurărilor motorului în curent continuu;

— măsurarea curentului și pierderilor la funcționarea în gol, la motoarele cu $U_n > 1$ kV;

— întocmirea buletinelor și interpretarea rezultatelor măsurărilor;

— verificarea comenzilor și semnalizărilor întreruptoarelor și automatelor de pornire;

— analiza reglajelor protecțiilor;

— verificarea realizării corecte a întregii instalații electrice, din punctul de vedere al respectării normelor RET, NTS și PCI;

— conectarea motorului în gol la rețea;

— analiza reglajelor protecțiilor și verificarea pe instalația finală;

— verificarea interacțiunii schemei de protecție și a funcționării blocajelor tehnologice;

— verificarea pe instalația finală a schemei de anclanșare automată a rezervei (AAR), la motoarele respective, și a automatizării existente;

— verificarea motoarelor la autopornire cu 0,7 U_n;

Scanned with OKEN Scanner

— verificarea nivelurilor de vibrații, din punctul de vedere al încadrării lor în limitele de siguranță a funcționării;
— verificarea încălzirii motorului, la funcționarea cu parametrii nominali;
— proba complexă de 72 ore;
— măsurarea randamentului;
— probele de încălzire;
— temperatura nominală și limită;
— regimul de funcționare pentru diverse temperaturi.

3.14.4. Probe preliminare pentru punere în funcțiune

În cadrul paragrafului 3.14.3 s-a arătat că mașina asincronă se supune înaintea primei porniri unor verificări și probe după un program stabilit de normele în vigoare.

În cele ce urmează se dau principalele probe preliminare pentru punerea în funcțiune, condițiile probelor, precum și valoarea parametrilor normați pentru motoarele cu curent alternativ.

Aceste probe preliminare sînt date în tabelul 3.14 și sînt valabile și pentru motorul sincron.

În afara celor arătate la paragraful 3.14.3 și în tabelul 3.14, se va verifica exactitatea legăturilor la placa de conexiuni. Electromotoarele trifazate utilizabile pentru tensiuni diferite în raportul 1,73 trebuie legate la ieșire în modul următor:

cînd tensiunea rețelei la care trebuie racordat direct electromotorul corespunde valorii superioare a tensiuni marcate pe plăcuța indicatoare, racordarea se execută conform schemei de la fig. 3.65, a;

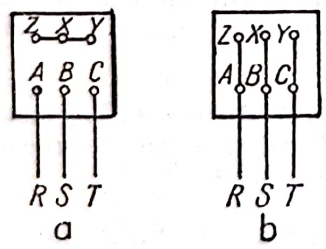


Fig. 3.65. Pornirea directă:
a — legătură stea; *b* — legătură triunghi.

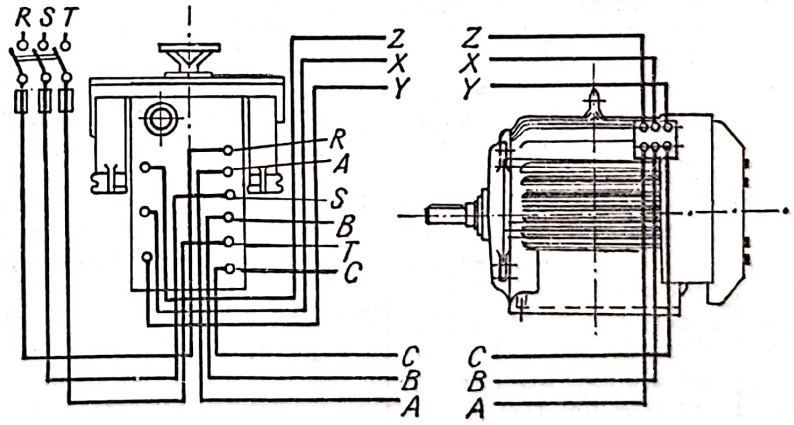


Fig. 3.66. Pornire stea-triunghi.

cînd tensiunea rețelei corespunde valorii inferioare a tensiunii marcate pe plăcuța indicatoare, cablurile de ieșire se așază și racordarea se execută conform schemei din fig. 3.65, b.

În cazul electromotoarelor avînd pornirea prin comutator stea — triunghi, toate cele șase ieșiri terminale se leagă la comutatorul stea — triunghi conform schemei din fig. 3.66.

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 3.14

Nr. crt.	Denumirea probei	Condițiile probei
1	Măsurarea rezistenței de izolație și a coeficientului de absorbție a înfășurărilor electromotorului	a. Se măsoară după cum urmează: — electromotoare avînd $U_n \geqslant 1$ kV sau $P_n \geqslant 50$ KW cu megohmmetrul de 2 500 V; — electromotoare avînd $U_n < 1$ kV, indiferent de putere, cu megohmmetrul de 1 000 V. Rezultatele măsurărilor nu se normează. Valorile obținute nu trebuie să fie mai mici decît 70% din datele inițiale. În lipsa lor se recomandă formula: $R_{iz} \geqslant \frac{U(v)}{1000 + \frac{S(kVA)}{100}}$ b. Coeficientul de absorbție R_{60}/R_{15} se măsoară pentru motoarele cu $U_n \geqslant 1$ kV Valoarea coeficientului nu se normează; ea se folosește pentru stabilizarea necesității uscării înfășurării. Uscarea se face cînd $R_{60}/R_{15} < 1{,}3$
2	Măsurarea rezistenței de izolație a lagărelor motoarelor și excitatoarelor montate pe același ax	Măsurarea se face după cum urmează: a. În timpul montajului: — se face cu megohmmetrul de 1 000 V, cu instalațiile de ungere montate. Rezistența de izolație nu trebuie să fie sub 1 MΩ b. În timpul funcționării motorului: — tensiunea între axul rotorului și fundație (masă) trebuie să fie egală cu tensiunea între lagăr și fundație, atunci cînd sînt șuntate straturile de ulei
3	Măsurarea rezistenței de izolație a bandajelor rotorice	Se măsoară cu megohmmetrul de 1 000 V. Rezultatele măsurării nu se normează. Ele se compară cu datele inițiale sau din uzină
4	Măsurarea rezistenței de izolație a traductoarelor de temperatură	Se măsoară cu megohmmetrul pînă la 500 V. Rezultatele măsurării nu se normează. Ele se compară cu datele inițiale
5	Încercarea izolației înfășurării statorice cu tensiune alternativă mărită (50 Hz)	Se încearcă fiecare separat față de masă, celelalte faze fiind legate la masă. Tensiunea de încercare are valorile prevăzute la capitolul 4.
6	Încercarea izolației înfășurării rotorice cu tensiunea alternativă mărită (50 Hz)	Tensiunea de încercare la punerea în funcțiune și reparația înfășurărilor este: 1. *motoare sincrone* Felul motorului — Tensiune eficace de încercare (kV) a. mașini cu pornire directă în curent polifazat: — dacă pornirea mașinii se face cu înfășurarea de excitație închisă pe rezistență sau pe sursa de alimentare — $0{,}75 \cdot 10\, U_{n\ exc.}$, însă minim 1,5 kV

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 3.14 (continuare)

Nr. crt.	Denumirea probei	Condițiile probei	
		— dacă pornirea mașinii se face cu circuitul de excitație deschis fragmentat pe secțiuni	0,75 (10 $U_{n\ exc.}$+1), însă minimum 1,5 kV.
		— dacă pornirea mașini se face cu circuitul de excitație deschis, nefragmentat	0,75 ($U_{n\ exc.}$+1), însă minimum 1,5 kV și maxim 8 kV.
		b. mașini cu pornirea altfel decît în curent polifazat:	
		— motoarele sincrone cu motoare de pornire	0,75·10 $U_{n\ exc.}$, însă minimum 1,5 kV
		— comutatoarele pornite cu motor de pornire sau în curent continuu	0,75 (2$U_{n\ exc.}$+1), însă minimum 1,5 kV.
		2. *motoare asincrone:*	
		Felul motorului	Tensiune eficace de încercare (kV)
		a. motoare reversibile	0,75 (4$U_{n\ exc.}$+1)
		b. motoare nereversibile	0,75 (2$U_{n\ exc.}$+1)
		$U_{n\ exc.}=U_n$ a înfășurării de excitație. Tensiunea de încercare la încercări periodice (o dată la 2 ani) este $U_{înc.}=1{,}5\ U_{n\ exc.}$ Durata menținerii tensiunii de încercare este de 1 min.	
7	Încercarea izolației între spirele înfășurării rotorice	Se execută numai la motoarele sincrone ale căror rotoare au poli aparenți. Valoarea tensiunii de încercare este de 2,5 V/spiră. Durata menținerii tensiunii de încercare este de 5′.	
8	Încercarea reostatelor de reglaj de pornire sau a rezistențelor de stingere a cîmpului, din instalația motoarelor, cu tensiune alternativă mărită	Încercarea se face pentru toate motoarele care au $U_n>36$ V Se încearcă: a) cu megohmmetrul de 2 500 V b) cu tensiune alternativă (50 H) de 1 000 V Încercarea se face cu ambele metode, în ordinea arătată. Valoarea rezistenței de izolație nu se normează. Ea se compară cu datele din uzină sau cele inițiale Durata menținerii tensiunii de încercare este de 1 min;	
9	Măsurarea rezistenței active a înfășurărilor electromotorului	Proba se execută la motoare cu $P_n\geqslant 50$ kW Se măsoară rezistența ohmică pe fiecare fază și ramură (unde există) Rezultatele obținute nu trebuie să difere cu mai mult de 2% între faze Pentru înfășurările rotorice, rezistența activă nu trebuie să difere cu mai mult de 2% față de datele din uzină sau inițiale	

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 3.14 (continuare)

Nr. crt.	Denumirea probei	Condițiile probei
10	Măsurarea rezistenței active a reostatelor de reglaj, de pornire sau a rezistenței de stingere a cîmpului (pentru motoare sincrone), care fac parte din instalația motoarelor	a. La motoare cu $U_n \geqslant 3$ kV, se măsoară rezistența activă totală și rezistența activă pe fiecare plot sau derivație b. La motoare cu $U_n < 3$ kV, se măsoară rezistența activă totală și continuitatea tuturor prizelor Rezultatele obținute nu trebuie să difere cu mai mult de 10% față de datele din fabrică sau inițiale
11	Verificarea succesiunii fazelor înfășurărilor statorice comparativ cu rețeaua	Se execută la motoarele cu $U_n > 3$ kV. (A se vedea Capitolul 4, paragraful 4.2.4)
12	Măsurarea parametrilor electrici la pornire	La pornire se vor determina: a) curentul absorbit la pornire (se recomandă la motoare de importanță mare, în funcție de condițiile de pornire, cu agregatul respectiv cuplat) b) timpul scurs de la conectarea sursei, pînă la turația nominală La turația nominală se măsoară curentul de funcționare în gol
13	Măsurarea întrefierului dintre stator și rotor	Măsurarea se face în conformitate cu copitolul 4 (paragraful 4.2.4). Rezultatele nu trebuie să difere cu mai mult de 10% față de valoarea medie egală cu semisuma lor
14	Măsurarea vibrațiilor lagărelor	Se măsoară la motoare care au $P_n \geqslant 200$ kW Pentru restul motoarelor se măsoară numai în cazuri speciale Vibrațiile nu trebuie să depășească 0,06 mm pentru motoarele electrice cu turații de 3 000 rot/min și 0,10 mm pentru motoarele electrice cu turații de 1 500 rot/min sau mai mici

Se va controla de asemenea dacă toate șuruburile bornelor de racord sînt bine strînse, pentru că altfel se provoacă încălzirea exagerată a cablului de legătură.

Înainte de punerea sub tensiune a înfășurărilor motorului se va verifica exactitatea legăturilor la placa de conexiuni.

3.14.5. Uscarea motoarelor

La motoarele noi, precum și la motoarele care nu au funcționat timp îndelungat, este uneori necesară operația de uscare înainte de punerea în funcțiune.

Drept criteriu pentru aprecierea necesității uscării izolației poate servi în afară de valoarea rezistenței de izolație și valoarea coeficientului de absorbție determinat cu formula: $K = R_{60}/R_{15}$, unde R_{15} și R_{60} sînt rezistențele de izolație măsurate după 15 respectiv 60 de secunde cu un

Scanned with OKEN Scanner

megohmmetru. Această valoare întotdeauna supraunitară, nu trebuie să fie mai mică de 1,3 . . . 1,5.

Condițiile care se impun unei uscări bune sînt:

temperatura trebuie ridicată treptat pînă la 70°C la măsurarea cu termometru și pînă la 90°C la măsurarea prin metoda rezistenței, urmărindu-se ca viteza de creștere a temperaturii înfășurării să nu fie mai mare decît 4°C/oră; se va înregistra valoarea temperaturii din 15 în 15 minute pînă la stabilizarea ei și apoi din oră în oră;

se vor instala în mod obligatoriu termometre la înfășurări și mai ales în gaura filetată din carcasă în care se înșurubează inelele de ridicare (la construcțiile care au inele de ridicare demontabile); termometrele trebuie să aibă rezervorul cu mercur înfășurat în staniol și după montare la locul de măsurare vor fi acoperite cu vată sau pîslă; la motoarele în construcție IP44 controlul încălzirii se face cu termometre montate în carcasă;

se va asigura ventilarea mașinii pentru a se grăbi procesul uscării, ventilația nu va fi însă prea puternică pentru a nu împiedica ridicarea temperaturii la limita necesară;

se continuă procesul de uscare circa 5 ore după ce rezistența de izolație și coeficientul de absorbție devin constante (la începutul uscării rezistența de izolație și coeficientul de absorbție scad din cauza evaporării apei și apoi cresc pînă rămîn constante). În cazul unei izolații bine uscate, coeficientul de absorbție poate atinge valorile 2 sau 3; durata uscării depinde de metoda de încălzire, de la 15 . . . 20 ore pînă la cîteva zile.

Metodele de încălzire cele mai folosite în vederea uscării sînt:

încălzirea din exterior suflînd aer cald uscat (70—90°C) asupra înfășurărilor;

încălzire prin curent electric de la surse independente.

În acest caz, la motoarele electrice asincrone trifazate, rotorul se blochează, iar statorul se alimentează de la o sursă de curent alternativ trifazat cu o tensiune de maximum 5—20% din tensiunea nominală.

Dacă rotorul este bobinat, înfășurarea lui se leagă în scurtcircuit (în timpul uscării se va urmări și încălzirea bandajelor rotorului și în caz că temperatura lor depășește 95°C, trebuie să micșoreze valoarea curentului sau să se întrerupă periodic alimentarea). Uscarea prin această metodă a motoarelor asincrone cu rotorul în scurtcircuit cu refulare de curent (motoare cu colivie și motoare cu bare înalte) trebuie efectuată cu rotorul scos, pentru a preveni eventualele supraîncălziri ale coliviei de pornire.

Dacă lipsesc surse corespunzătoare pentru alimentarea statorului, motoarele electrice asincrone trifazate cu rotorul bobinat se mai pot usca alimentînd înfășurarea rotorică cu o tensiune de maximum 15—20% din tensiunea nominală între inele. Și de această dată rotorul se blochează, iar înfășurarea statorului se leagă în scurtcircuit.

În cazul existenței unei surse reglabile de curent continuu sau alternativ monofazat, acestea vor fi utilizate pentru uscare, ținînd seama că valoarea inițială a curentului nu trebuie să depășească 75% din valoarea lui nominală (pentru faza cea mai solicitată). Dacă se utilizează curent alternativ monofazat, înfășurările rotorice ale motoarelor asincrone se scurt-

Scanned with OKEN Scanner

circuitează, iar rotoarele în scurtcircuit cu refulare de curent pot fi lăsate în interiorul statorului numai dacă înfăşurarea statorică se leagă în triunghi deschis.

Încălzirea prin curent de scurtcircuit se foloseşte numai pentru uscarea motoarelor sincrone. În acest caz se scurtcircuitează fazele prin ampermetrele lor, înaintea întreruptorului de alimentare. Se învîrteşte maşina la turaţie redusă şi se reglează curentul de excitaţie astfel încît în stator să se obţină jumătate din curentul său nominal. După 2—3 ore se începe trecerea curentului nominal, avînd însă grijă să nu se producă încălziri locale.

3.14.6. Pornirea

După ce s-a constatat că maşina este în perfectă stare de funcţionare şi este gata pentru a fi pornită, este necesar a se efectua o pornire de probă în gol, urmată de o funcţionare continuă pentru o durată de maximum 3 ore. În acest caz trebuie verificat dacă nu există zgomote din cauza frecărilor pieselor; de asemenea se verifică vibraţia maşinii.

Se mai verifică încălzirea lagărelor (rulmenţilor) şi încălzirea părţilor active ale maşinii. Încălzirea lagărelor şi a părţilor active ale maşinii nu trebuie să depăşească valorile indicate de uzina constructoare (în mod uzual 80°C).

După pornirea de probă a motorului şi punerea la punct a mecanismului pentru care el este destinat, se poate pune motorul în exploatare.

Există cîteva metode pentru a porni aceste maşini.

Pornirea directă sau pornirea în plină sarcină direct pe reţea. În acest caz, timpul pînă ce motorul ia turaţia normală, este de la 2 . . . 3 pînă la 10 secunde [17]. Acest timp depinde de mărimea cuplului motorului, de cuplul static rezistent la arbore şi de mărimea momentului de inerţie al corpurilor antrenate în mişcare de rotaţie (a rotorului maşinii şi a rotorului mecanismului cuplat la maşină).

Pornirea directă este permisă pentru puteri pînă la 2 kW, la tensiunea 220 V şi pînă la puteri de 3 kW, la tensiunea de 380 V. Dacă se cer porniri directe la motoare mai mari, este necesară aprobarea uzinei furnizoare de energie.

Pornirea cu ajutorul comutatorului stea-triunghi. În acest caz comutatorul stea-triunghi va fi adus din poziţia „0“ în poziţia pornire; cînd motorul va atinge turaţia constantă sau turaţia sa de funcţionare normală, comutatorul va fi pus în poziţia „sarcină“.

Pornirea cu ajutorul autotransformatorului. Motoarele mari, cu rotorul în scurtcircuit, pot fi pornite cu ajutorul autotransformatorului. În acest caz, schema de conexiuni trebuie dată de uzina furnizoare. În cazul maşinii în stare caldă, se permite numai o singură pornire. În cazul necesităţii unui număr mai mare de porniri, maşina trebuie în prealabil răcită.

Independent de metoda de pornire, un motor normal cu rotorul în scurtcircuit, poate fi pornit în stare rece maximum de 2—3 ori în 8 ore.

Scanned with OKEN Scanner

Pentru pornire, la motoarele cu inele de contact se folosește o rezistență reglabilă, introdusă în circuitul rotorului. În acest scop se conectează întreruptorul trifazat, după ce se așază controlerul rezistenței pe poziția 1, verificînd astfel comportarea motorului la pornire și direcția de rotație. (Poziția 1 corespunde rezistenței maxime.

Dacă motorul pornește bine și în direcția dorită, controlerul se învîrtește treaptă cu treaptă, pînă la ultima poziție. Trecînd de la o treaptă la cea următoare, motorul trebuie să-și sporească progresiv turația pînă la valoarea normală, care corespunde ultimei trepte. Controlerul nu trebuie să treacă repede peste aceste trepte, pentru că în acest caz motorul va absorbi curenți mari, ceea ce va avea ca urmare arsuri la inelele de contact și perii, provocînd uzura prematură a acestor elemente.

După oprirea motorului, controlerul se întoarce imediat pe poziția „0" (circuitul rotoric deschis).

3.14.7. **Funcționarea în sarcină**

În timpul funcționării mașinii, trebuie controlată periodic încălzirea diferitelor părți ale ei. Nici o parte a motorului nu trebuie să se încălzească exagerat. Se poate admite pentru înfășurare, în cazul temperaturii mediului ambiant de +40°C și pentru electromotoare de uz general

+105°C temperatură măsurată cu termometrul;

+80°C încălzirea (supratemperatura) determinată cu ajutorul rezistențelor înfășurării.

Pentru lagăre se poate admite +80°C temperatură măsurată cu termometrul.

3.15. ÎNTREȚINEREA MOTORULUI ASINCRON ÎN TIMPUL EXPLOATĂRII

3.15.1. **Generalități**

Cunoscînd că pentru o funcționare sigură este necesar ca în orice moment starea mașinii din punct de vedere mecanic și electric să fie normală, iar eficacitatea ventilației să nu fie afectată prin înfundarea circuitelor de ventilație, se impune ca în funcție de condițiile de exploatare și de gradul de protecție a mașinii să se stabilească periodicitatea lucrărilor de întreținere (întreținere curentă, revizii parțiale și generale) ce trebuie respectată cu rigurozitate [71, 73].

Periodicitatea verificărilor și reparațiilor planificate depinde în întregime de condițiile în care sînt exploatate mașinile, înțelegîndu-se prin aceasta regimul de lucru, caracteristicile mediului în care mașinile sînt montate (umiditatea acestuia, conținutul de praf, temperatura aerului înconjurător), tipul de protecție pe care îl are mașina etc.

Scanned with OKEN Scanner

La intervalele de timp determinate, în raport cu condițiile locale existente în exploatare, trebuie executate reparații preventive, care includ controlul și verificarea multilaterală a mașinii.

Întreținerea mașinilor electrice constă în principal în întreținerea următoarelor elemente: piese de contact, inele de contact, perii și portperii, lagăre, precum și în păstrarea curățeniei mașinii.

În timpul exploatării trebuie urmărită temperatura anumitor părți componente ale mașinii cum sînt înfășurările, lagărele, oțelul circuitului magnetic. Starea izolației mașinii trebuie controlată periodic.

3.15.2. Termenele pentru revizii și reparații*

Nu există forme și prescripții cu privire la perioadele la care se fac operațiile de întreținere și cuprinsul lor.

După [6] reviziile și reparațiile se recomandă a fi împărțite în două cateogrii, și anume: una la care periodicitatea este mai puțin dependentă de condițiile concrete în care lucrează mașina și o a doua la care este strîns legată de aceste condiții. Primei categorii i se atribuie simbolul R iar celei de a doua simbolul r. La rîndul său fiecare categorie este formată din cîte patru grupe notate cu 0—1—2—3, grupe care definesc amploarea lucrărilor de revizie. Vor exista deci reviziile și reparațiile R0, R1, R2, R3 și respectiv r0, r1, r2, r3.

În cele ce urmează se indică operațiile cuprinse în fiecare din grupele arătate.

Grupa R0 (pe cît posibil săptămînal):

— revizuirea buloanelor de fixare pe fundație;

— verificarea transmisiei (așezarea șaibei de curea, pinionului, cuplei etc.);

— verificarea lipsei de gripare a inelelor de ungere în cazul lagărelor de alunecare;

— verificarea nivelului uleiului la lagărele unse cu ulei;

— verificarea lipsei încălzirilor locale.

Grupa r0 (la intervale mai mici decît R0):

— verificarea culisării pieselor portperiilor;

— verificarea colectorului ca el să nu prezinte urme ale unei comutații necorespunzătoare.

Grupa R1 (pe cît posibil lunar):

— revizuirea buloanelor de fixare a scuturilor și capotelor de ventilație;

— revizuirea legăturii la pămînt;

— verificarea lipsei zgomotului la rulmenți;

---

* Se tratează pentru mașini electrice rotative în general.

Scanned with OKEN Scanner

— verificarea strîngerii legăturilor la cutia de borne;
— verificarea sistemului de fixare a portperiilor;
— verificarea uzurii periilor (suprafața de lucru, înălțimea de lucru);
— reglarea presiunii periilor;
— examinarea lipiturilor la inelele de contact;
— verificarea nedeplasării colierelor portperiilor.

Grupa r1 (la intervale mai mici ca R1):
— curățirea exteriorului mașinii;
— suflarea canalelor de ventilație;
— suflarea interiorului mașinii (în cazul în care mașina nu este de construcție închisă);
— verificarea rezistenței de izolație a înfășurărilor;
— curățirea inelelor de contact, periilor și portperiilor.

Grupa R2 (pe cît posibil la 6 luni):
— verificarea distanței dintre portperii și inele de contact;
— curățirea palierelor;
— examinarea căilor de rulare a rulmenților pentru a se constata dacă au apărut urme de uzură și deci trebuie înlocuiți;
— examinarea sistemului de cuplare;
— verificarea buloanelor de strîngere a polilor;
— verificarea lipiturilor la colector;
— verificarea întrefierului;
— verificarea stării bandajelor și penelor de fixare a înfășurărilor.

Grupa r2 (la intervale mai mici ca R2):
— ungerea rulmenților.

Grupa R3 (pe cît posibil anual):
— curățirea sau înlocuirea pieselor care prezintă urme de rugină;
— demontarea sistemului de cuplare, examinarea pieselor componente și înlocuirea celor defecte;
— strunjirea colectoarelor sau inelelor colectoare (dacă este cazul);
— demontarea portperiilor și suporților portperiilor și curățirea lor.

Grupa r3 (la intervale mai mici ca R3):
— controlul amănunțit al înfășurărilor pentru a se constata lipsa de scurtcircuite;
— curățirea amănunțită a înfășurării și corectarea peliculei de acoperire în locurile în care au apărut crăpături.

Perioadele la care se fac lucrările încadrate în grupele r0, r1, r2 și r3 depind foarte mult de condițiile concrete în care sînt exploatate mașinile; ele nu vor depăși însă perioadele reviziilor R0, R1, R2 și R3.

Scanned with OKEN Scanner

La fiecare revizie și reparație se fac și lucrările prevăzute pentru reviziile și reparațiile precedente, de exemplu în cadrul reparației R2 se efectuează și lucrările prevăzute pentru R0 și R1.

Dat fiind că îngrijirea mașinilor este calea cea mai sigură pentru realizarea bunei lor funcționări, se recomandă respectarea termenelor indicate și efectuarea integrală a lucrărilor prevăzute.

Pentru realizarea programului de întreținere este necesar să se demonteze unele părți ale mașinilor electrice sau să se efectueze o demontare totală.

Este important de știut modul de demontare și montare a mașinilor electrice.

3.15.3. Demontarea mașinilor electrice asincrone

Uzinele constructoare de mașini electrice, în majoritatea cazurilor, odată cu livrarea mașinii electrice respective trimit instrucțiuni privind demontarea și montarea mașinii electrice livrate.

Operațiile de montare și demontare făcute incorect pot conduce la distrugerea sau deteriorarea unor piese ale mașinii electrice respective și chiar la avarii grave în timpul funcționării. Fiecare mașină electrică are particularitățile ei constructive, de care trebuie să se țină seama atît la demontare cît și la operația inversă acesteia, la montare.

În cele ce urmează se va expune pe scurt mersul operațiilor de demontare pentru motoarele uzuale din seria ASI (22—200 kW) și AFI (16—160 kW).

Motoarele ASI sînt motoare asincrone cu rotorul în colivie, închise, cu ventilație exterioară. Construcția acestor motoare pentru seria ASI fabricată de Uzina de Mașini Electrice din București, se prezintă ca în fig. 3.67.

Corespunzător notațiilor din figură, mersul operațiilor pentru demontarea motorului electric este prezentat în cele ce urmează.

Demontarea rulmentului cu role (partea de tracțiune):

— se scoate pana *1* din locașul penei de la capul de arbore;

— se deșurubează șuruburile *2* și se scoate căpăcelul exterior *3*;

— se deșurubează șuruburile *4*, apoi se scoate scutul 5 din partea de tracțiune împreună cu inelul exterior al rulmentului (inclusiv rolele);

— se scoate inelul exterior al rulmentului cu role bătînd ușor cu ciocanul de jur împrejur, prin intermediul unei piese din fier moale, în suprafața sa laterală;

— cu ajutorul unor prese de extracție, sprijinite pe partea frontală a axului (prin intermediul unei piese de fier moale) și trăgînd de inelul interior al rulmentului, se scoate inelul interior al rulmentului și căpăcelul interior *6*.

Demontarea rotorului din motor: pentru aceasta se execută operațiile anterioare și în plus:

— se desfac șuruburile 7 și se scoate capota ventilatorului exterior *8;*

Scanned with OKEN Scanner

— se desfac şuruburile *9* şi se scoate scutul *10* de pe scaunul său prin baterea cu un ciocan de jur împrejur;

— se scoate din stator rotorul împreună cu scutul, ventilatorul exterior şi ventilatorul interior;

— rotorul astfel demontat se aşază pe o capră.

Demontarea completă: se execută operaţiile de pînă acum şi în plus:

— se desface şurubul *11* şi se scoate ventilatorul exterior *12;*

— se desfac şuruburile *13* şi se scoate căpăcelul exterior *14;*

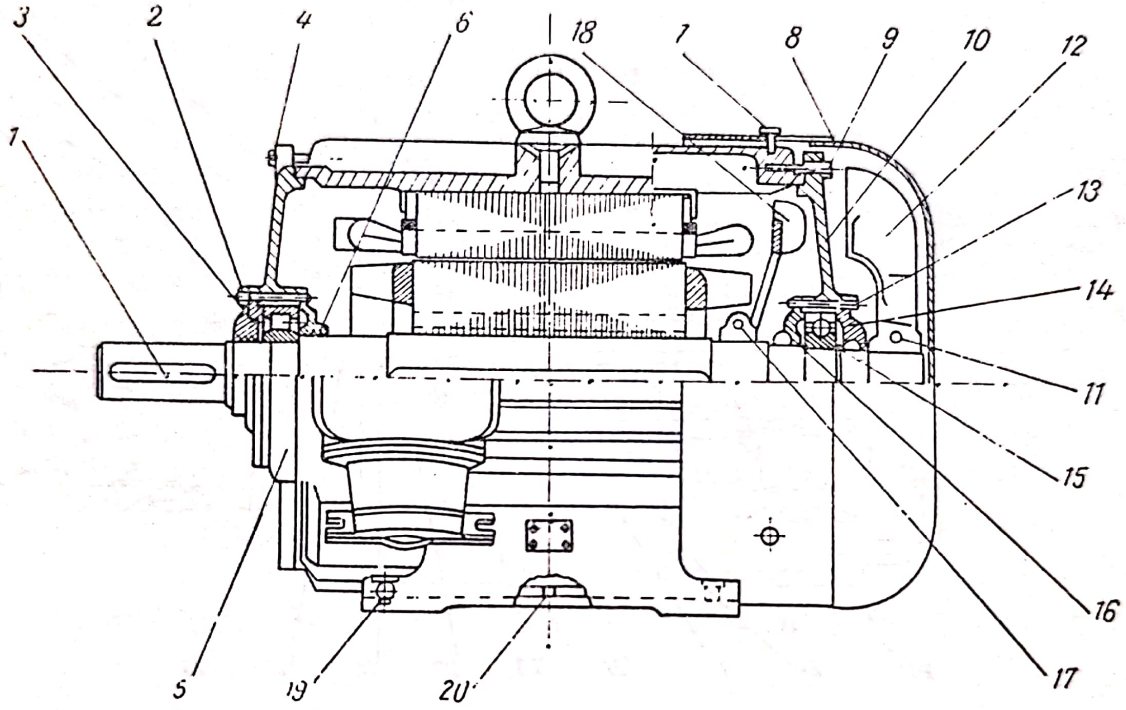


Fig. 3.67. Motor asincron închis cu ventilaţie exterioară, din seria ASI.

— se scoate scutul *10* prin baterea de jur împrejur cu un ciocan;

— se scoate inelul de siguranţă *15;*

— se demontează rulmentul pe bile (rulmentul suport) cu ajutorul unei piese de extracţie sprijinită pe capul axului prin intermediul unei piese de fier moale;

— se scoate căpăcelul interior *16;*

— se desface şurubul *17* şi se scoate ventilatorul *18.*

Poziţia *19* din figura 3.67 indică borna de legare la pămînt, iar poziţia *20* indică gaura de evacuare a apei de condensare.

Motoarele din seria AFI fabricate de UMEB sînt motoare cu inele de contact, de construcţie închisă (IP 44), cu ventilaţie exterioară (fig. 3.68).

Corespunzător notaţiilor din figura 3.68, în general mersul operaţiilor pentru demontarea motorului electric, cu inele de contact este schiţat în cele ce urmează.

Scanned with OKEN Scanner

Demontarea rulmentului cu role (partea de tracțiune):

— se scoate pana *1* din locașul penei de la capul de ax;

— se deșurubează șuruburile *2* și se scoate căpăcelul exterior *3;*

— se deșurubează șuruburile *4*, apoi se scoate scutul *5* din partea de tracțiune împreună cu inelul exterior al rulmentului (inclusiv rolele);

— se scoate inelul exterior al rulmentului cu role, bătînd ușor cu ciocanul de jur împrejur, prin intermediul unei piese de fier moale, în suprafața sa laterală;

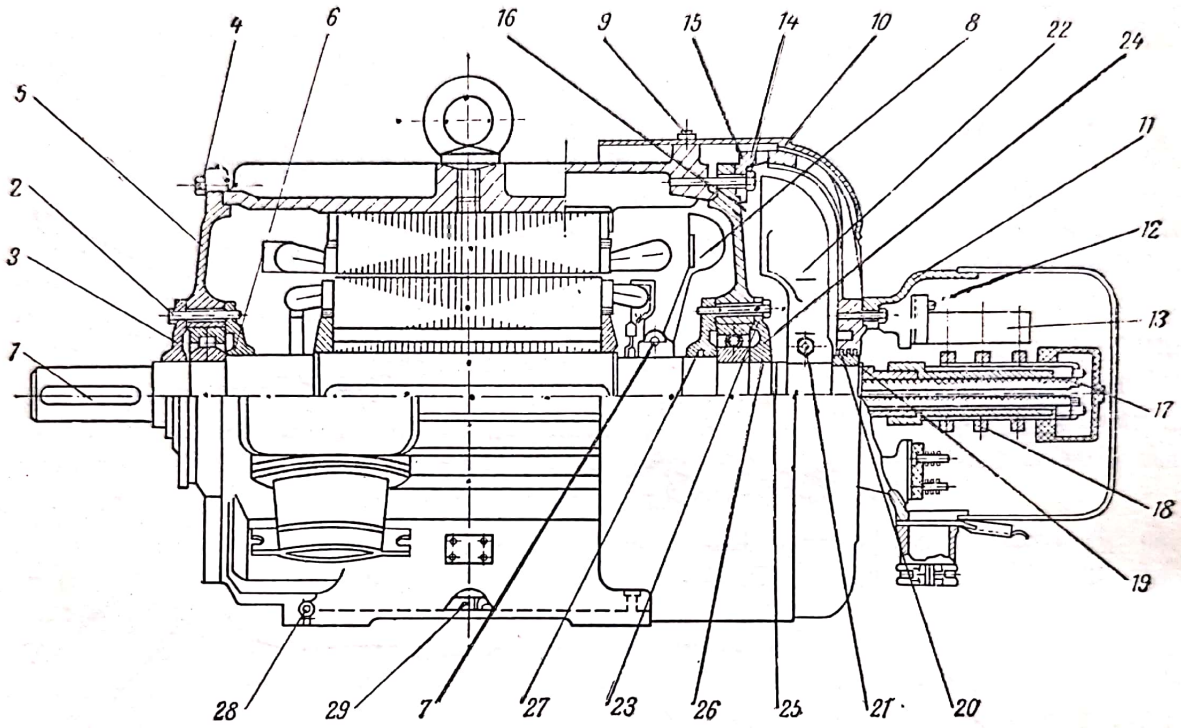


Fig. 3.68. Motor asincron cu inele de contact, din seria AFI.

— cu ajutorul unei prese de extracție, sprijinită pe partea frontală a axului (prin intermediul unei piese de fier moale) și trăgînd de inelul interior al rulmentului, se scoate inelul interior al rulmentului și căpăcelul interior *6*.

Demontarea rotorului de motor: pentru aceasta se execută operațiile anterioare și în plus:

— se desfac șuruburile *9* și se scoate capota ventilatorului exterior *10*, după demontarea cutiei terminale pentru cable rotor;

— se deschide cutia inelelor de contact *11*, se deșurubează șuruburile *12* și se scoate blocul port-perii *13;*

— se desfac șuruburile *14* și se scoate crucea suport *15* și cutia inelelor colectoare, apoi se scoate scutul *16* de pe scaunul său, prin batere cu un ciocan de jur împrejur;

— se scoate din stator rotorul, împreună cu scutul, cutia de contact și ventilatorul exterior;

— rotorul astfel demontat se așază pe o capră.

Scanned with OKEN Scanner

Demontarea completă: se execută operațiile anterioare, apoi:

— se deslipesc cele trei legături terminale *17* ale bobinajului;

— folosind filetul interior al bucșei inelelor de contact (filet M 52×2), se depresează inelele colectoare *18;*

— se scoate inelul de siguranță *19* și se trage bucșa *20* afară;

— se deșurubează șurubul *21* și se scoate ventilatorul exterior *22;*

— se desfac șuruburile *23* și se scoate căpăcelul exterior;

— se scoate scutul prin baterea de jur împrejur cu un ciocan;

— se scoate inelul de siguranță *25* și bucșa *26;*

— se demontează rulmentul pe bile (rulmentul suport), cu ajutorul unei prese de extracție sprijinită pe capul axului, prin intermediul unei piese găurite de fier moale, așa încît să fie protejate cablele de ieșire ale rotorului;

— se scoate căpăcelul interior *24;*

— se deșurubează șurubul de siguranță *7* și apoi se scoate ventilatorul interior *8* cu ajutorul unei prese de extracție, sprijinită pe partea frontală a arborului, prin intermediul unei piese de fier moale.

Poziția *28* din figura 3.68 indică borna de legare la pămînt, iar poziția *29* indică gaura (șurubul) pentru apa de condensare.

Din cele arătate rezultă că motorul se demontează în părți principale (stator, rotor, scuturi) ceea ce permite examinarea mașinii și stabilirea defecțiunilor pe care le prezintă, creindu-se condițiile necesare efectuării reviziei sau reparației după caz.

3.16. DEFECTE ȘI REGIMURI ANORMALE DE FUNCȚIONARE

3.16.1. **Generalități**

În timpul exploatării și uneori chiar cu ocazia punerii în funcțiune apar unele defecte ale motorului care conduc fie la imposibilitatea punerii în funcțiune, fie la constatarea că motorul funcționează în regim anormal [60, 70].

Defectele motoarelor asincrone au multiple cauze care determină manifestări diferite după natura lor.

Dintre cele mai importante defecte ale motoarelor asincrone sînt enumerate mai jos cîteva și anume:

— motorul nu pornește sau nu intră în turația nominală în gol sau în sarcină;

— motorul se supraîncălzește la funcționarea în gol sau la funcționarea în sarcină;

— motorul are o funcționare zgomotoasă;

— la pornire sau în timpul funcționării periile scînteiază sau apare un cerc de foc la inelele de contact.

Se vor explica în cele ce urmează aceste defecte, cauzele care le produc și modul de înlăturare [80].

Scanned with OKEN Scanner

3.16.2. Motorul nu pornește sau nu intră în turația nominală în gol sau în sarcină

Acest defect se manifestă sub mai multe forme.

Pornire anormală. *Refuzul de a porni poate proveni din cauza întreruperii unui conductor de alimentare, sau a înfășurării statorului sau rotorului, eventual a întreruptorului stea-triunghi la motoarele cu rotorul tip colivie.*

Se controlează dacă siguranțele sau blocul de protecție de la întreruptorul automat au întrerupt alimentarea și se înlocuiesc, respectiv se închide întreruptorul: se caută și se elimină o eventuală întrerupere a conductoarelor de alimentare. Spre a verifica dacă este întreruptă înfășurarea statorului, se cercetează siguranțele, se desprind conductoarele de la placa cu borne și se cercetează pe rînd înfășurările cu ajutorul unui megohmmetru. Dacă este întreruptă o singură fază statorică, motorul pornește uneori în ambele sensuri dacă este ajutat cu mîna. Examinarea înfășurării rotorului se face peste inelele de contact. Se restabilesc legăturile întrerupte, care se găsesc de obicei în punctul neutru al stelei înfășurării sau la pornitor.

Pornirea grea, urmată de scăderea mare a turației cînd se încarcă motorul, poate proveni din cauza întreruperii unei faze a rotorului, (atunci turația scade la aproximativ 50% din cea nominală) sau din cauza deslipirii barelor cînd rotorul este tip colivie, ca urmare a faptului că motorul prevăzut cu pornire prin întreruptor stea-triunghi, a fost pornit în triunghi. Același defect apare cînd înfășurarea statorului este legată în stea, deși ar trebui legată în triunghi la tensiunea nominală a rețelei, sau dacă tensiunea de alimentare este prea joasă.

În primul caz trebuie controlat cu o lampă de încercare dacă cele trei inele sînt sub tensiune, dacă legătura la pornitor este bună, dacă nu este întreruptă rezistența pornitorului, dacă periile rotorului se aplică bine pe inele și dacă resortul pornitorului stabilește bine contactul cu contactele lui, cum și contactul barelor coliviei cu inelul de conexiune al coliviei (inelul de scurtcircuitoare) și se elimină eventualul defect.

În cazul al doilea se schimbă legătura din stea în triunghi. În cazul al treilea se cercetează căderea de tensiune pînă la motor, se schimbă conductele de alimentare cu altele mai groase sau se anunță, dacă este nevoie, uzina spre a lua măsuri de remediere.

Pornirea motoarelor cu rotorul tip colivie numai cînd întreruptorul stea-triunghi este în poziția de legătură în triunghi, poate proveni din cauza unei întreruperi în întreruptor, sau din cauză că mecanismul antrenat opune un cuplu de pornire prea mare, pe care motorul nu-l poate învinge la legătura în stea.

În primul caz se restabilește legătura întreruptorului, în al doilea trebuie micșorată sarcina la pornire; dacă nu este admisibil curentul de pornire care se stabilește cînd motorul pornește cu legătura în triunghi, se alege un motor mai mare sau se înlocuiește cu unul cu inele de contact și pornitor.

Scanned with OKEN Scanner

Pornirea bruscă a motoarelor cu inele de contact cînd pornitorul este scos în parte din circuit, şi anume cînd contactul lui ajunge în dreptul unei arsuri, provine din cauza unei întreruperi în locul amintit.

În cazul acestui defect care nu este al motorului, se scurtcircuitează întreruperea sau se înlocuieşte pornitorul.

Pornirea grea, uneori numai din anumite poziţii ale rotorului, *însoţită de zgomot şi încălzire* poate proveni din cauza uzării lagărelor de alunecare ceea ce produce frecarea rotorului de stator, sau numai un întrefier neuniform. Fisurarea scuturilor la locaşurile de rulment are acelaşi efect ca şi uzarea lagărelor de alunecare.

Se verifică dacă axul motorului are joc după verticală sau în direcţia în care trage cureaua de transmisie, iar în caz afirmativ se înlocuiesc piesele defecte.

Turaţia anormală. Turaţia anormală a motoarelor asincrone se defineşte ca acea turaţie care este mai mică decît cea normală sau cu sensul greşit.

Motorul porneşte în sens greşit atunci cînd legăturile a două faze sînt schimbate una cu alta.

Se desprind două faze de la cutia de borne şi se schimbă între ele; dacă motorul este cu rotorul tip colivie şi are întreruptor stea-triunghi, se schimbă între ele două din conductoarele care duc la întreruptor.

Turaţia scăzută la jumătate însoţită de zgomot provine din cauza întreruperii unei faze a rotorului şi a fost amintită la pornirea anormală.

Turaţia scăzută, însoţită de curenţi inegali în cele trei faze ale statorului, poate proveni din cauza unui contact slab la legături, perii sau inelele de contact, sau a legăturii greşite a unei faze, care este defazată cu o şesime de perioadă, în loc de o treime, faţă de cea vecină, sau căreia i s-a schimbat începutul cu sfîrşitul.

Se restabileşte contactul bun, se pun în ordine periile şi inelele de contact sau se corectează legarea fazelor, după cum este cazul.

Turaţia scăzută faţă de cea nominală poate proveni din cauză că înfăşurarea nu este potrivită, ceea ce face să se producă, în afară de cîmpul magnetic fundamental al motorului, şi alte cîmpuri cu un număr de poli egal cu un multiplu întreg al numărului de poli ai primului cîmp. Aceste cupluri parazite determină funcţionarea stabilă a motorului la turaţii de valoare mai scăzută decît valoarea normală. Turaţia sincronă a acestor cîmpuri este corespunzător mai mică şi pune motorul să lucreze ca generator asincron, imediat deasupra acestor turaţii critice, micşorîndu-i cuplul motor şi nepermiţîndu-i să treacă la turaţiile amintite.

O altă cauză ar fi rezistenţa înfăşurării rotorului prea mare. În acest caz se înlocuieşte rotorul.

Capacitate de încărcare scăzută. *Cuplul mic, însoţit de scăderea bruscă a turaţiei*, poate proveni de la un contact slab în legăturile înfăşurării statorului.

Se va restabili contactul.

Cuplul aproape normal, însoţit de o scădere mare a turaţiei şi chiar de oprirea motorului, poate proveni din cauza tensiunii prea joase cauzată de încărcare şi de conductoarele de aducere prea subţiri, din cauza

Scanned with OKEN Scanner

alegerii greşite a unui motor prea mic sau din cauza legării înfăşurării statorului în stea în loc de triunghi.

Se aduce tensiunea la valoarea nominală, se înlocuieşte motorul cu unul potrivit, respectiv se face legătura în triunghi.

Sarcină însoţită de curent de alimentare prea mare şi de zgomot, poate proveni din cauza scurtcircuitului interior al unei faze din stator.

Se caută cu mîna locul spirelor scurtcircuitate, care se încălzesc mai mult. Această operaţie este aplicabilă în cazul motoarelor care în stare montată au înfăşurările accesibile; în caz contrar se demontează un palier şi se alimentează motorul cu tensiune scăzută. Se rebobinează fazele în funcţie de felul înfăşurării şi de lacul cu care a fost impregnat.

Cuplul redus însoţit de o scădere mare a turaţiei între funcţionarea în gol şi în plină sarcină, poate proveni din cauza unei rezistenţe prea mari în circuitul înfăşurărilor rotorului, produse de exemplu la perii, sau din cauza conductoarelor prea lungi sau prea subţiri dintre rotor şi pornitor.

Se pune în ordine dispozitivul de scurtcircuitare a periilor, se strunjesc, dacă este cazul, inelele colectoare, respectiv se scurtează sau înlocuiesc cu altele mai groase, conductele dintre rotor şi pornitor.

3.16.3. Motorul se supraîncălzeşte la mersul în gol sau la mersul în sarcină

Încălzirea (supratemperatura) înfăşurărilor şi inelelor de contact a motoarelor asincrone este standardizată în funcţie de clasa de izolaţie a conductoarelor, a tecilor din crestăturile statorului şi rotorului, a materialului de solidarizare a inelelor de contact.

Clasa de izolaţie uzuală este clasa E de izolaţie, care permite o încălzire a înfăşurărilor de maximum 75°C faţă de mediul ambiant, care de asemenea nu trebuie să depăşească 40°C.

Cu alte cuvinte înfăşurările maşinilor cu această clasă de izolaţie nu trebuie să aibă o temperatură mai mare de 115°C.

Sesizarea încălzirii peste limitele admisibile a înfăşurărilor rotorului sau statorului se face de obicei de către electricianul de întreţinere în mod indirect prin:

— temperatura exterioară a carcasei motorului;
— temperatura aerului de răcire;
— miros anormal în jurul locului de funcţionare al motorului; degajare de fum.

Încălzirea se localizează în general în următoarele părţi ale motoarelor:

— oţelul activ al statorului;
— înfăşurarea statorului;
— înfăşurarea sau barele rotorului;
— inelele de contact şi periile colectoare.

Se expun în cele ce urmează, cîteva din cele mai frecvente situaţii de supraîncălzire a motoarelor asincrone.

Scanned with OKEN Scanner

Încălzirea exagerată a statorului și rotorului însoțită de alunecare mare și cu timpul, de declanșarea automatului de protecție, provine din cauza supraîncărcării.

Se verifică sarcina, măsurînd curentul cu un ampermetru. Dacă sarcina este prea mare și nu se poate micșora, se alege un motor mai mare; dacă motorul a funcționat normal un anumit timp acționînd aceeași mașină, se examinează acea mașină și se înlătură cauza suprasarcinii.

Încălzirea exagerată a statorului, chiar și la funcționarea în gol, însoțită de declanșarea automatului de protecție provine din cauză că înfășurarea statorului ar trebui montată în stea la tensiunea nominală a rețelei și este montată din eroare în triunghi, ceea ce nu poate surveni decît la prima punere în funcțiune a motorului, la tensiunea amintită. La motoarele cu inele de contact legătura greșită se poate constata măsurînd tensiunile dintre inele și observînd că sînt cu 73% mai mari decît se indică pe eticheta motorului.

Se schimbă legătura înfășurării statorului din triunghi în stea.

Încălzirea exagerată din loc în loc a statorului, însoțită de supracurent în unele faze, de cuplu motor scăzut și de zgomot puternic al motorului, cînd rotorul este voit blocat și înfășurarea statorică cuplată la rețea, provine din cauza scurtcircuitului interior al bobinelor din înfășurarea statorului.

Se înlocuiesc bobinele cu scurtcircuit interior.

Încălzirea exagerată a rotorului, însoțită uneori și de aceea a statorului și de turație scăzută, de supracurent, uneori inegal pe diferitele faze cînd motorul este cu inele de contact, de cuplu motor prea slab și de zgomot puternic. Acest defect poate proveni din cauza unui contact slab în înfășurarea rotorică (la inelele coliviei motoarelor cu rotorul în scurtcircuit, la inelele de contact sau la pornitor), ceea ce conduce la concluzia că una din faze nu lucrează în plin (faza rotorică cu curentul mai mare).

Se restabilește contactul bun, după cum este cazul, prin curățire, strîngerea șuruburilor sau lipirea ulterioară.

Încălzirea exagerată a inelelor de contact, însoțită uneori la motoarele cu inele de contact de încălzirea exagerată a portperiilor, poate proveni din cauza frecării prea mari dintre perii și inele, din cauza contactului slab dintre perii și portperii sau din cauza supraîncărcării inelelor și a periilor.

În primul caz se ung inelele, eventual zilnic, cu puțină vaselină și se țin curate, ca și periile; în al doilea caz, se examinează contactul dintre perii și portperii, alegîndu-se eventual o calitate mai potrivită de cărbune; în al treilea caz se măsoară curentul rotoric și, dacă este prea mare față de cel indicat pe etichetă, se caută și se înlătură cauza.

Încălzirea exagerată a rotorului la pornirea în sarcină, însoțită de creșterea înceată a turației sau de turație prea joasă, urmată, la motoarele cu inele, de pornire în gol fără a fi nevoie să se mai acționeze pornitorul, provine din cauza scurtcircuitului interior al unei bobine din rotor.

Se rebobinează bobinele spre a se elimina scurtcircuitul interior.

Încălzirea exagerată a rotorului însoțită de funcționarea motorului cu aproximativ jumătate din turația nominală și de zgomot puternic, pro-

Scanned with OKEN Scanner

vine din întreruperea unei faze a rotorului, cauzată eventual numai de faptul că o perie nu se aplică bine pe inelul ei sau pe contactul pornitorului.

Se caută cu megohmmetrul locul întreruperii; se rebobinează rotorul dacă ruptura este în interiorul înfășurării lui; se pun periile în ordine dacă este cazul; se strunjesc inelele de contact, dacă nu mai sînt cilindrice; se îndreaptă contactul din pornitor, dacă este cazul.

Uneori, și în special la mașinile foarte mari, pot apărea fenomene de supraîncălzire care se localizează numai în oțelul activ, înfășurările rămînînd în limitele de temperatură admisibilă.

Dacă oțelul activ al statorului este supraîncălzit uniform, cu toate că sarcina motorului nu depășește pe cea nominală, atunci tensiunea rețelei este mai mare decît cea nominală.

Se va micșora tensiunea rețelei pînă la cea nominală.

Dacă aceasta nu este posibil, atunci se va intensifica ventilația motorului, consultînd uzina producătoare asupra metodelor de intensificare a ei. Dacă după intensificarea ventilației, supraîncălzirea este totuși mai mare decît cea admisibilă și devine periculoasă, în cazul funcționării neîntrerupte a motorului, atunci se va înlocui motorul cu altul, la care tensiunea nominală corespunde cu cea a rețelei.

Dacă se observă supraîncălziri locale ale oțelului activ, la funcționarea în gol și tensiunea rețelei se menține la valoarea nominală, atunci între diversele tole ale oțelului activ s-au produs scurtcircuite locale, provocate de bavuri, formate la decuparea tolelor, sau provocate de frecarea rotorului cu statorul în timpul funcționării motorului.

Se vor înlătura bavurile. Se vor prelucra locurile scurtcircuitate cu o pilă fină; se vor desface tolele și se vor lăcui cu un lac izolant care se usucă în aer.

Dacă tolele oțelului activ au fost scurtcircuitate prin intermediul buloanelor de strîngere (la mașinile de construcție veche), se va restabili izolația buloanelor de strîngere sau se vor înlocui buloanele defecte cu altele noi. În majoritatea cazurilor, pentru aceasta este necesar ca înfășurarea statorului să fie parțial sau total refăcută.

Dacă dinții statorului s-au ars în unele locuri și au provocat scurtcircuite în înfășurarea statorului sau străpungeri ale înfășurării la masă (carcasă), se vor ajusta sau se vor tăia porțiunile defecte. Între tole se vor așeza foițe fine din prespan sau din mică și se vor lăcui cu un lac izolant. O asemenea metodă de reparare dă de obicei rezultate bune în cazul izolării cu atenție a tolelor una față de alta, pentru preîntîmpinarea formării unor noi scurtcircuite interioare. În cazul unui mare număr de tole deteriorate este necesar să se efectueze refacerea lor totală și reîmpachetarea, ceea ce necesită rebobinarea statorului. La repararea înfășurării trebuie să se verifice starea oțelului activ al statorului, controlîndu-se dacă nu există atingeri între tole. Verificarea se va face cu un bobinaj de magnetizare alimentat cu o tensiune monofazată, care să producă în oțel o inducție egală cu 1 T (10 000 gauss). Dacă nu apar supraîncălziri locale, înseamnă că reparația a fost bine executată.

Scanned with OKEN Scanner

3.16.4. Motorul are un mers zgomotos

Mersul liniştit al unui motor asincron este o condiţie necesară, dar nu suficientă, ca motorul să nu aibă defecţiuni. În orice caz, apariţia zgomotelor anormale este un semn că au apărut defecţiuni sau că vor apare defecţiuni care pot scoate motorul din serviciu.

Se redau în cele ce urmează cîteva din situaţiile care se întîlnesc în exploatare, de funcţionare zgomotoasă şi care obligă pe electricianul de întreţinere să ia măsurile corespunzătoare.

Motorul porneşte greu şi bîzîie puternic; intensitatea curentului în toate trei fazele este diferită, iar la funcţionarea în gol este mai mare decît cea nominală.

Se poate întîmpla ca una din fazele înfăşurării statorului să fie inversată; în general, aceasta se întîmplă la motoarele care au şase borne, din cauza conectării greşite a capetelor bobinelor la placa bornelor.

Se va efectua conectarea capetelor fazelor pe placa bornelor conform schemei de conexiuni din fişa tehnică a motorului, iar în lipsa aceasteia, după notaţiile capetelor înfăşurării utilizate în schemele normale (fig. 3.69).

Dacă notaţiile cu litere lipsesc şi nu se poate verifica schema de conexiune a înfăşurării, conectarea corectă a capetelor înfăşurării se poate obţine după determinarea începuturilor şi sfîrşiturilor fiecărei faze.

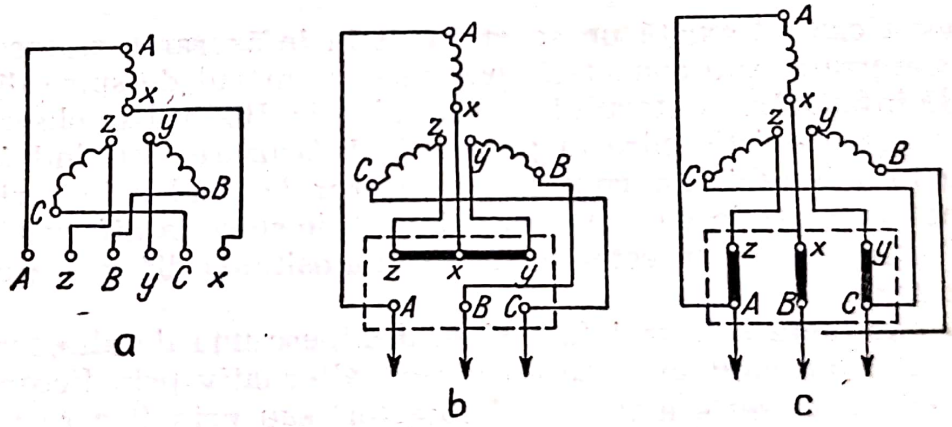


Fig. 3.69. Amplasarea bornelor bobinajelor statorice trifazate, în cazul a şase borne:
a — în rînd; *b* şi *c* — pentru efectuarea comodă a conexiunilor în stea sau în triunghi.

Se poate întîmpla ca numai comutatorul să fie conectat greşit cu motorul. Această situaţie se referă la motoarele cu rotorul în scurtcircuit, la care pornirea se face prin comutarea înfăşurării statorului din stea în triunghi, prin intermediul unui comutator special (comutator stea-triunghi).

Se va verifica şi se va conecta corect comutatorul cu motorul.

În timpul funcţionării motorului rotorul atinge statorul.

În acest caz, este posibil ca întrefierul dintre stator şi rotor să nu mai fie uniform ca urmare a uzurii bucşelor lagărelor, a deplasării scuturi-

Scanned with OKEN Scanner

lor, a instalării greșite a suporturilor de lagăre, a deformației oțelului activ al statorului sau al rotorului, cum și a îndoirii arborelui. În cazul lagărelor cu rulmenți defectul poate fi cauzat și de fisurarea scuturilor.

Se va verifica jocul dintre fuse și bucșe și în cazul cînd nu corespunde cu cel prescris, se vor încărca bucșele sau se vor înlocui cu altele noi; se va controla interfierul dintre stator și rotor, se vor monta știftuile de asamblare în scuturile lagărelor sau în suporturile de lagăre, dacă acestea lipsesc; dacă oțelul activ al statorului este deformat, se va ajusta cu o pilă ascuțită evitîndu-se însă formarea bavurilor; dacă este deformat oțelul activ al rotorului, acesta se va strunji sau se va șlefui cu un disc abraziv de carborund; se va verifica arborele.

Este, de asemenea, posibil ca rotorul să nu fie bine echilibrat, în care caz se va echilibra rotorul.

Se mai poate întîmpla să existe o atingere între spire și diverse alte forme de scurtcircuit în înfășurarea statorului sau sînt conectate greșit fazele statorului. Din aceste cauze se distorsionează cîmpul magnetic și rotorul este supus unei atracții unilaterale. În această situație, rotorul este atras spre partea opusă defectului, deoarece în locul defect, fluxul magnetic va fi mult slăbit de acțiunea demagnetizantă a porțiunii scurtcircuitate din înfășurare.

Motorul bîzîie puternic; intensitatea curentului în toate fazele este diferită; încălzirea (supratemperatura) înfășurării statorului nu este uniformă.

În acest caz nu există un scurtcircuit în înfășurarea statorului, înfășurarea statorului este conectată greșit sau numărul de spire din diverse bobine ale înfășurării statorului nu este identic. Bîzîitul se observă numai în cazul în care există spire în paralel în înfășurare sau cînd fazele sînt conectate în triunghi. La conectarea tuturor bobinelor în serie și cînd fazele sînt conectate în stea, numărul inegal de spire în diferite bobine nu provoacă zgomot. Acesta este cauzat de intensitatea diferită a curentului în diverse faze.

Se desfac toate cele trei faze și se deslipesc una de alta toate ramurile în paralel. Pe rînd se trece un curent alternativ prin fiecare fază (în cazul conectării în serie a tuturor bobinelor) sau prin fiecare ramură (în cazul conectării în paralel a bobinelor), iar cu un voltmetru se va măsura tensiunea la celelalte grupe de bobine. La grupele de bobine care au spire puține, tensiunea va fi mai mică, decît la cele care sînt în stare normală. Cea mai mare diferență admisibilă dintre tensiunile măsurate la diverse grupe de bobine nu trebuie să depășească 5%.

Încercarea se poate executa și cu rotorul montat.

Cînd rotorul montat este de tip bobinat, încercarea se poate efectua la tensiunea nominală. Dacă rotorul este scos afară sau dacă acesta este în scurtcircuit și montat, tensiunea aplicată statorului nu trebuie să depășească 15 . . . 20% din tensiunea nominală a motorului.

Verificarea numărului de spire al statorului se poate face, de asemenea, prin alimentarea motorului pe partea rotorului (în cazul motorului cu rotorul bobinat) și măsurarea tensiunii induse în stator în cele trei faze.

Scanned with OKEN Scanner

Motorul funcţionează normal, însă se aude un zgomot de tonalitate joasă; intensitatea curentului este aceeaşi în toate trei fazele.

În acest caz grupele de bobine din înfăşurarea statorului sînt repartizate nesimetric dacă există ramuri în paralel (fig. 3.70, *b*).

Această distribuţie nesimetrică a bobinelor are efecte mai pronunţate cînd întrefierul dintre stator şi rotor nu este uniform, provocînd uneori vibraţia maşinii.

Se va uniformiza cu atenţie întrefierul dintre motor şi stator.

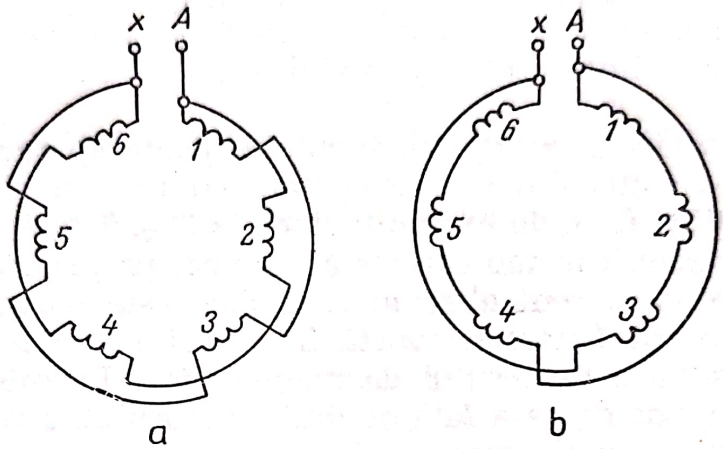


Fig. 3.70. Repartizarea grupelor de bobine ale unei faze a bobinajului statorului unui motor trifazat cu şase poli şi două căi de curent în paralel:

a — repartizare simetrică; *b* — repartizare nesimetrică.

Se va conecta înfăşurarea statorului după schema din fig. 3.70, *a*, repartizîndu-se grupurile de bobine ale fiecărei ramuri în paralel în mod uniform pe toată circumferinţa statorului. Se menţionează că legarea bobinelor după schema din fig. 3.70, *a* este dificilă mai ales la maşinile cu mulţi poli, de tensiune înaltă, din cauza întretăierii legăturilor dintre diferitele grupuri de bobine. Din această cauză, uzinele constructoare de maşini electrice execută adesea bobinaje cu ramuri în paralel după schema din fig. 3.70, *b*.

Se va mări întrefierul cu 10—20%, strunjindu-se în acest scop rotorul. Trebuie să se aibă în vedere că mărirea întrefierului conduce la o micşorare a factorului de putere şi la scăderea puterii.

Motorul provoacă în timpul funcţionării un zgomot puternic, de tonalitate înaltă (şuierat), care încetează imediat ce s-a întrerupt curentul; uneori zgomotul este însoţit de o vibraţie puternică.

Este vorba de vibraţia dinţilor rotorului şi statorului, ca urmare a alegerii greşite a raportului dintre numărul dinţilor rotorului şi ai statorului. În momentul cînd axele de simetrie ale unora din dinţii statorului coincid cu cele ale rotorului, între dinţii statorului şi cei ai rotorului apar forţe de atracţie unidirecţionale.

În timp ce rotorul se învîrteşte, forţa de atracţie se deplasează cu o mare viteză, provocînd vibraţia arborelui rotorului. Vibraţia se poate

extinde şi asupra statorului, dacă acesta nu este suficient de rigid. Zgomotul este provocat de aceste vibraţii mecanice, care au loc într-un mediu elastic (aerul). Intensitatea zgomotului depinde de gradul de deformaţie a pieselor, de frecvenţa cu care acţionează forţele magnetice care apar, de proprietăţile elastice ale materialului şi de caracteristicile acustice ale maşinii.

Din experienţă, este cunoscut că vibraţiile foarte mari şi deci zgomotul (şuieratul) foarte mare, pot atinge valori periculoase, cînd frecvenţa oscilaţiilor întreţinute ale pieselor (de exemplu, ale rotorului) coincid cu oscilaţiile proprii. În asemenea cazuri, motorul nu mai poate funcţiona din cauza frecării dintre rotor şi oţelul activ al statorului ca urmare a vibraţiilor.

Tot din experienţă rezultă că zgomotul poate apărea la motoarele la care înfăşurarea statorului este executată cu un număr fracţionar de crestături pe poli şi fază, de exemplu cînd $q = 2^1/_2$, $3^1/_2$, $4^1/_2$ etc.

Şuieratul obişnuit al motoarelor asincrone, propriu tuturor utilajelor electromagnetice de curent alternativ, se datoreşte fenomenelor de magnetostricţiune. Acest fenomen constă în variaţia volumurilor corpurilor feromagnetice supuse procesului de magnetizare. La mişcarea rotorului, dinţii acestuia se vor deplasa faţă de dinţii statorului şi vor provoca o variaţie a fluxului magnetic care la rîndul său va provoca variaţii bruşte, periodice, ale inducţiei magnetice în dinţii statorului şi rotorului.

Din această cauză, volumul dinţilor variază în mod periodic, creîndu-se acel şuierat continuu în timpul funcţionării motorului. Acest şuierat devine excesiv cînd saturaţia magnetică a dinţilor motorului este mare.

Acest defect este constructiv şi se înlătură numai schimbînd motorul, dacă uzina constructoare nu garantează că zgomotul şi vibraţiile ce apar nu pun în pericol motorul şi agregatul pe care îl deserveşte.

La motoarele cu două turaţii, zgomotul de natura celui descris mai sus apare însă frecvent la turaţia mică, ca urmare a faptului că la aceste motoare se utilizează în general de uzinele constructoare tole de stator şi rotor de la motoarele uzuale, construite pentru funcţionarea la o singură turaţie.

Uzinele constructoare, în asemenea situaţii, îşi iau însă toate măsurile ca vibraţiile acestor maşini să nu pericliteze buna funcţionare a agregatelor pe care le deservesc.

3.16.5. Periile scînteiază la pornire sau în timpul funcţionării

Scîntei la inelele de contact se pot ivi la prima punere în funcţiune a unui motor sau la motoare care au funcţionat normal pînă la ivirea deranjamentului.

Scînteile la inelele de contact pot proveni din mai multe cauze.

Periile nelustruite destul sau apăsate cu forţe diferite pe inele, aşa încît nu se aplică uniform pe ele.

Scanned with OKEN Scanner

Se lustruiesc cu hîrtie abrazivă suprafețele de contact ale periilor cu inelele, se întind egal resoartele, sau se curăță portperiile, pentru ca acestea să nu se înțepenească în ele.

Murdărirea periilor și a inelelor de contact.

Se curăță cu benzină periile și inelele, eventual se lustruiesc inelele cu hîrtie abrazivă fină.

Inelele care nu sînt cilindrice.

Se șlefuiesc cu dispozitivul de șlefuire sau se strunjesc.

Slăbirea prinderilor inelelor.

Remedierea acestui neajuns trebuie făcută de un specialist, de obicei de la uzina constructoare.

Periile montate sînt de marcă necorespunzătoare.

Se va consulta cartea tehnică a motorului pentru montarea periilor corespunzătoare.

La pornirea motorului, la inelele de contact apare un cerc de foc.

În general această situație se datorește următoarelor cauze:

inelele de contact și dispozitivul periilor sînt îmbîcsite de ulei, praf de cărbune sau praf de cupru, datorită unei lipse de supraveghere și întreținere. Se vor curăți inelele colectoare și portperiile;

mediul înconjurător este umed sau saturat cu vapori de acizi sau baze. Defectul apare în general la motoarele ale căror rotoare funcționează cu tensiune înaltă. Toate piesele conductoare de curent ale dispozitivului periilor și tijele se vor izola suplimentar sau se va înlocui motorul cu unul destinat a funcționa în mediul înconjurător respectiv;

este întreruptă una din legăturile dintre rotor și reostatul de pornire sau o legătură din interiorul reostatului.

Se verifică legăturile dintre rotor și reostatul de pornire și în interiorul reostatului și se elimină întreruperea sau se repară contactul slab.

Scanned with OKEN Scanner

4. MAŞINA SINCRONĂ

4.1. PROPRIETĂȚILE PRINCIPALE ALE MAȘINII SINCRONE

4.1.1. Ecuația tensiunii generatorului sincron cu poli înecați

Se va considera indusul constituit de stator iar inductorul de rotor. Sistemul reprezentat de înfășurarea statorului fiind simetric, este suficient să se studieze o singură fază.

Ecuația tensiunii generatorului rezultă din aplicarea legii inducției electromagnetice, sau a ecuației unui circuit cu o tensiune la borne [3, 12, 13, 14, 21, 22]. Notînd cu:

R — rezistența unei faze a indusului;
X_σ — reactanța de scăpări a unei faze a indusului;
$\underline{U}$ — tensiunea la borne pe faza generatorului;
$\underline{I}$ — curentul statoric pe fază;
$\underline{U}_{ea}$ — tensiunea electromotoare indusă pe faza indusului de fluxul magnetic de reacție a indusului;
$\underline{U}_{eo}$ — tensiunea electromotoare indusă pe faza indusului de fluxul magnetic inductor

se obține, adoptînd regula de asociere a sensurilor de la generator:

$$\underline{U} = -R\underline{I} - jX_\sigma \underline{I} + \underline{U}_{ea} + \underline{U}_{eo}. \tag{4.1}$$

Dacă se utilizează reactanța ciclică utilă și se neglijează pierderile de oțel, rezultă:

$$\underline{U}_{ea} = -\frac{j\omega}{\sqrt{2}} \Psi_a = -jX_a \underline{I}$$

Scanned with OKEN Scanner

și

$$\underline{U}=-R\underline{I}-\mathrm{j}X_\sigma\underline{I}-\frac{\mathrm{j}\omega}{\sqrt{2}}\Psi_a+\underline{U}_{eo} \qquad (4.1\ a)$$

sau

$$\underline{U}=-R\underline{I}-\mathrm{j}X_\sigma\underline{I}-\mathrm{j}X_a\underline{I}+\underline{U}_{eo}. \qquad (4.1\ b)$$

Dacă nu s-ar neglija pierderile de oțel, atunci ar trebui introdusă în locul impedanței $\mathrm{j}X_a$ impedanța $\underline{Z}_a=R_a+\mathrm{j}X_a$ unde R_a corespunde pierderilor de oțel conform teoriei circuitului cu miez de oțel.

Pierderile în oțel influențează într-o măsură însemnată numai asupra randamentului, dar nu și asupra celorlalte caracteristici de funcționare. De aceea nu se va ține seama de pierderile în oțel la scrierea ecuațiilor tensiunilor.

Dacă se notează:

$X_s=X_\sigma+X_a$ reactanța sincronă a mașinii, ecuația tensiunii mașinii sincrone este

$$\underline{U}=-R\underline{I}-\mathrm{j}X_s\underline{I}+\underline{U}_{eo} \qquad (4.2)$$

sau

$$\underline{U}=-R\underline{I}-\mathrm{j}X_\sigma\underline{I}+\underline{U}_e, \qquad (4.2\ a)$$

unde

$$\underline{U}_e=\underline{U}_{eo}-\mathrm{j}X_a\underline{I}=\underline{U}_{eo}+\underline{U}_{ea}$$

reprezintă tensiunea electromotoare indusă pe o fază a statorului de suma dintre fluxul inductor și fluxul de reacție a indusului; este deci tensiunea electromotoare indusă de fluxul rezultant în întrefier, iar X_a este reactanța ciclică utilă (prin care se ține seama și de existența celorlalte două faze ale indusului).

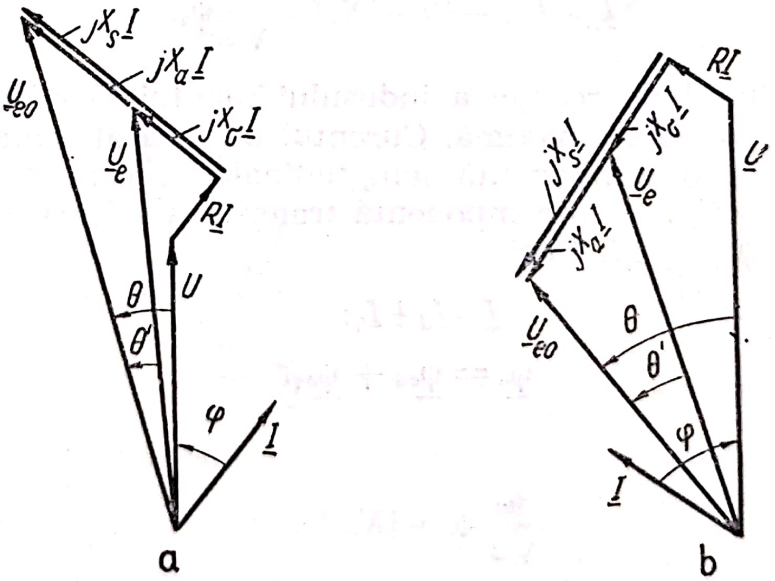


Fig. 4.1. Diagrama de fazori a mașinii sincrone, la funcționarea cu generator:
a — la sarcină inductivă; *b* — la sarcină capacitivă.

În fig. 4.1 este reprezentată diagrama de fazori a mașinii sincrone construită pe baza ecuației (4.2) pentru două cazuri: sarcina cu caracter inductiv, sarcina cu caracter capacitiv.

Scanned with OKEN Scanner

Din examinarea diagramelor de fazori, rezultă că pentru a realiza o anumită tensiune la borne, în cazul sarcinii inductive, tensiunea electromotoare produsă de fluxul magnetic inductor trebuie să fie suficient de mare, pentru a se opune efectului tensiunii electromotoare produse de fluxul magnetic de reacție a indusului.

Pentru a realiza aceeași tensiune la borne, în cazul sarcinii capacitive, tensiunea electromotoare produsă de fluxul inductor trebuie să fie mai mică. Rezultă că reacția indusului are un efect demagnetizant în cazul sarcinii inductive și un efect magnetizant în cazul sarcinii capacitive.

Prin urmare, pentru a realiza la borne aceeași tensiune și același curent, este necesar un curent de excitație mai mare în cazul sarcinii inductive decît în cazul sarcinii capacitive. De asemenea rezultă că tensiunea la borne este mai mică decît tensiunea electromotoare produsă de cîmpul magnetic inductor în cazul sarcinii inductive, dar poate fi mai mare în cazul sarcinii capacitive.

4.1.2. Ecuația tensiunii generatorului sincron cu poli aparenți

Pentru a stabili ecuația tensiunii generatorului sincron cu poli aparenți se utilizează teoria dublei reacții [22, 23, 38].

Ecuația tensiunii generatorului rezultă din aplicarea legii inducției electromagnetice sau a ecuației unui circuit cu o tensiune la borne. Se va utiliza regula de asociere a sensurilor pentru generator. Se obține,

$$\underline{U}=\underline{U}_{eo}-R\underline{I}-\mathrm{j}X_{\sigma}\underline{I}-\frac{\mathrm{j}\omega}{\sqrt{2}}\underline{\psi}_{a},$$

unde ψ_a este fluxul de reacție a indusului înlănțuit de o fază a statorului și are ca modul valoarea maximă. Curentul de fază al indusului I poate fi descompus într-o componentă longitudinală I_d care produce fluxul longitudinal $\psi_{ad}=L_{ad}I_d$ și o componentă transversală I_q care produce fluxul transversal $\psi_{aq}=L_{aq}I$. Deci

$$\underline{I}=\underline{I}_d+\underline{I}_q; \tag{4.3 a}$$

$$\underline{\psi}_a=\underline{\psi}_{ad}+\underline{\psi}_{aq}. \tag{4.3 b}$$

Dar

$$\frac{\mathrm{j}\omega}{\sqrt{2}}\underline{\psi}_d=\mathrm{j}X_{ad}\underline{I}_d;$$

$$\frac{\mathrm{j}\omega}{\sqrt{2}}\underline{\psi}_q=\mathrm{j}X_{aq}\underline{I}_q.$$

Rezultă

$$\underline{U}=\underline{U}_{eo}-R\underline{I}-\mathrm{j}X_d\underline{I}_d-\mathrm{j}X_q\underline{I}_q \tag{4.4}$$

Scanned with OKEN Scanner

unde s-a notat:

$X_d = X_\sigma + X_{ad}$ — reactanța longitudinală;

$X_q = X_\sigma + X_{aq}$ — reactanța transversală.

4.1.3. Diagrama de fazori a tensiunilor și curenților generatorului sincron cu poli aparenți (diagrama Blondel)

Diagrama de fazori a tensiunilor și curenților se poate construi utilizînd ecuația (4.4).

Se va considera mai întîi cazul sarcinii cu caracter inductiv. Se presupun cunoscuți parametrii mașinii, fazorii $\underline{U}$, $\underline{I}$ și de asemenea unghiul dintre fazorii $\underline{U}$ și $\underline{U}_{e0}$. Se construiește diagrama de fazori din fig. 4.2

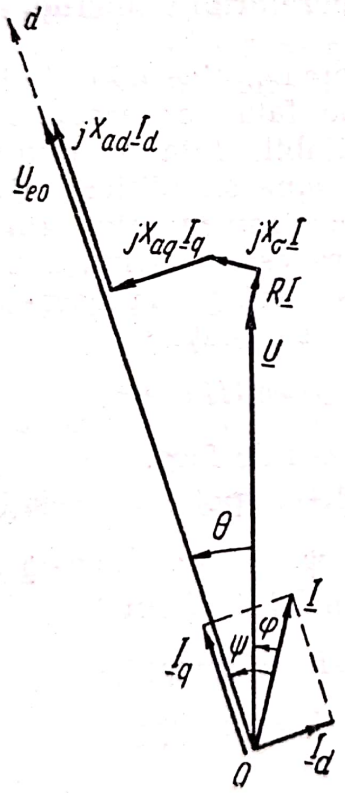


Fig. 4.2. Diagrama de fazori a tensiunilor și curenților generatorului sincron cu poli aparenți, la sarcină inductivă.

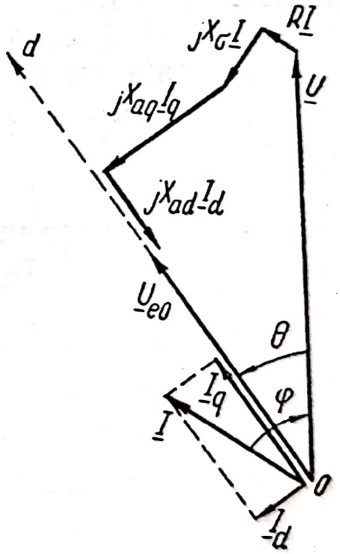


Fig. 4.3. Diagrama de fazori a tensiunilor și curenților generatorului sincron cu poli aparenți, la sarcină capacitivă.

unde s-a luat ca bază fazorul $\underline{U}$. Se descompune fazorul $\underline{I}$ în componenta $\underline{I}_q$ în fază cu $\underline{U}_{e0}$ și componenta $\underline{I}_d$ defazată cu 90° față de $\underline{U}_{e0}$. Rezultă imediat fazorii $R\underline{I}$, $jX_d\underline{I}_d$, $jX_q\underline{I}_q$ care adăugați fazorului $\underline{U}$ dau fazorul

Scanned with OKEN Scanner

$\underline{U}_{eo}$ și se obține diagrama de fazori din fig. 4.2. Pe această diagramă s-a notat cu φ defazajul dintre tensiune și curent la bornele mașinii, cu ψ defazajul dintre $\underline{I}$ și $\underline{U}_{eo}$ și cu θ defazajul dintre tensiunea la bornele unei faze a indusului și tensiunea electromotoare indusă în aceeași fază de fluxul inductor. Defazajul θ se numește unghiul intern al mașinii. Acest unghi variază în funcție de sarcină.

În cazul sarcinii capacitive se obține diagrama de fazori din fig. 4.3.

Din aceste diagrame de fazori rezultă că un curent defazat în urmă, produce un cîmp care se opune cîmpului magnetic inductor, iar un curent defazat înainte produce un cîmp care se adună cîmpului magnetic inductor.

Determinarea experimentală a parametrilor electrici și a caracteristicilor de funcționare necesită în general încercări, dintre care unele sînt relativ complexe și se tratează în lucrările consacrate încercărilor mașinilor electrice.

4.1.4. Puterea electromagnetică a generatorului sincron

Se va stabili expresia puterii electromagnetice admițînd simplificările următoare: rezistența este neglijabilă față de reactanța de scăpări a indusului, pierderile în oțel sînt neglijabile față de puterea mașinii. În acest caz diagrama de fazori este diagrama simplificată (fig. 4.4).

Cu simplificările admise puterea electromagnetică P_M numită și puterea interioară, adică acea putere care este transmisă de la inductor la indus este egală cu puterea transferată pe la bornele generatorului. Prin urmare se poate scrie

$$P_M = mUI \cos \varphi,$$

unde m este numărul de faze.

În baza fig. 4.4 se pot scrie relațiile:

$$P_M = mUI \cos(\psi - \theta) = mUI \cos\psi \cos\theta + mUI \sin\psi \sin\theta;$$

$$I_d = I \sin\psi;$$

$$I_q = I \cos\psi;$$

deci

$$P_M = mUI_q \cos\theta + mUI_d \sin\theta. \qquad (4.5)$$

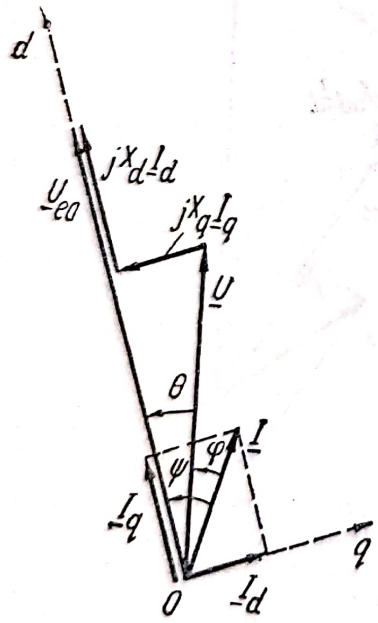


Fig. 4.4. Diagrama de fazori simplificată a mașinii sincrone cu poli aparenți, utilizată la calculul puterii electromagnetice.

Proiectînd conturul poligonal al diagramei de fazori a tensiunii din fig. 4.4 pe axele Od și Oq se obține:

$$U \cos\theta = U_{eo} - X_d I_d;\ I_d = \frac{U_{eo} - U\cos\theta}{X_d}; \qquad (4.6\ a)$$

$$U \sin\theta = X_q I_q;\ I_q = \frac{U \sin\theta}{X_q}. \qquad (4.6\ b)$$

Scanned with OKEN Scanner

Înlocuind expresiile (4.6 a și 4.6 b) în relația (4.5) se obține după unele transformări:

$$P_M = m\frac{UU_{eo}}{X_d}\sin\theta + m\frac{1}{2}U^2\left(\frac{1}{X_q}-\frac{1}{X_d}\right)\sin 2\theta, \qquad (4.7)$$

unde

$$P'_M = m\frac{UU_{eo}}{X_d}\sin\theta$$

se numește componenta principală a puterii electromagnetice;

$$P''_M = m\frac{1}{2}U^2\left(\frac{1}{X_q}-\frac{1}{X_d}\right)\sin 2\vartheta$$

se numește componenta auxiliară a puterii electromagnetice.

În fig. 4.5 sînt reprezentate puterile electromagnetice ale generatorului sincron P_m, P'_M, P''_M în funcție de unghiul intern θ pentru o mașină sincronă cu poli aparenți.

La mașina sincronă cu poli înecați $X_d = X_q$ deci $P''_M = 0$ și rămîne numai componenta principală a puterii electromagnetice. De aceea puterea electromagnetică a mașinii sincrone cu poli înecați este dată de relația

$$P_M = m\frac{UU_{eo}}{X_d}\sin\theta. \qquad (4.8)$$

Din fig. 4.5 se vede că odată cu creșterea sarcinii adică cu creșterea lui P_M, dacă U și U_{eo} sînt constante, crește și unghiul intern θ, pînă se ajunge la valoarea maximă a lui P_M. Dacă unghiul intern θ crește mai mult, puterea electromagnetică scade.

Valoarea maximă a puterii electromagnetice a mașinii sincrone cu poli înecați se realizează la $\theta = \frac{\pi}{2}$. Valoarea maximă a puterii electromagnetice a mașinii sincrone cu poli aparenți se obține la o valoare $\theta < \frac{\pi}{2}$ după cum se poate vedea și din fig. 4.5, din cauza influenței componentei auxiliare a puterii electromagnetice.

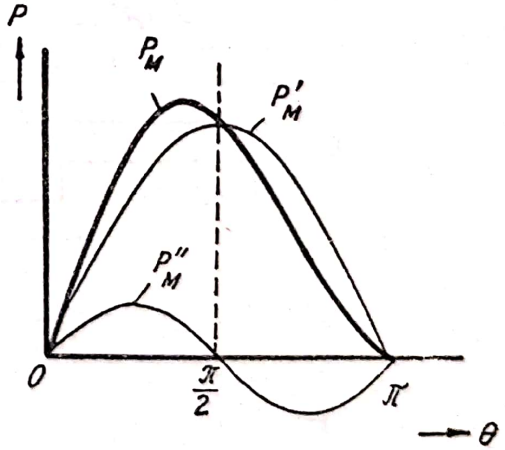


Fig. 4.5. Puterile electromagnetice ale generatorului sincron P_M, P'_M, P''_M, în funcție de unghiul intern θ.

4.1.5. Funcționarea motorului sincron

Generatorul sincron transformă energia mecanică primită pe la arbore de la motorul primar, în energie electromagnetică cedată pe la borne. Atunci elementul *conducător* este rotorul și elementul *condus* cîmpul magnetic rezultant din întrefier, care se rotește odată cu rotorul. Axa cîmpului

Scanned with OKEN Scanner

magnetic inductor adică axa polilor rotorici este decalată înainte cu unghiul electric θ' față de axa cîmpului magnetic rezultant în întrefier. Unghiul electric θ' diferă doar puțin de unghiul electric intern θ iar această diferență este determinată de căderea de tensiune pe rezistența și reactanța de scăpări a indusului. De aceea liniile cîmpului magnetic din întrefierul generatorului sincron, la funcționarea în sarcină nu sînt radiale, ci sînt înclinate. În fig. 4.6, *a* este reprezentată configurația care cuprinde: polii inductori ai rotorului, curba prin care se pun în evidență polii cîmpului magnetic rezultant în întrefier și liniile cîmpului magnetic în întrefier pentru funcționarea ca generator în sarcină.

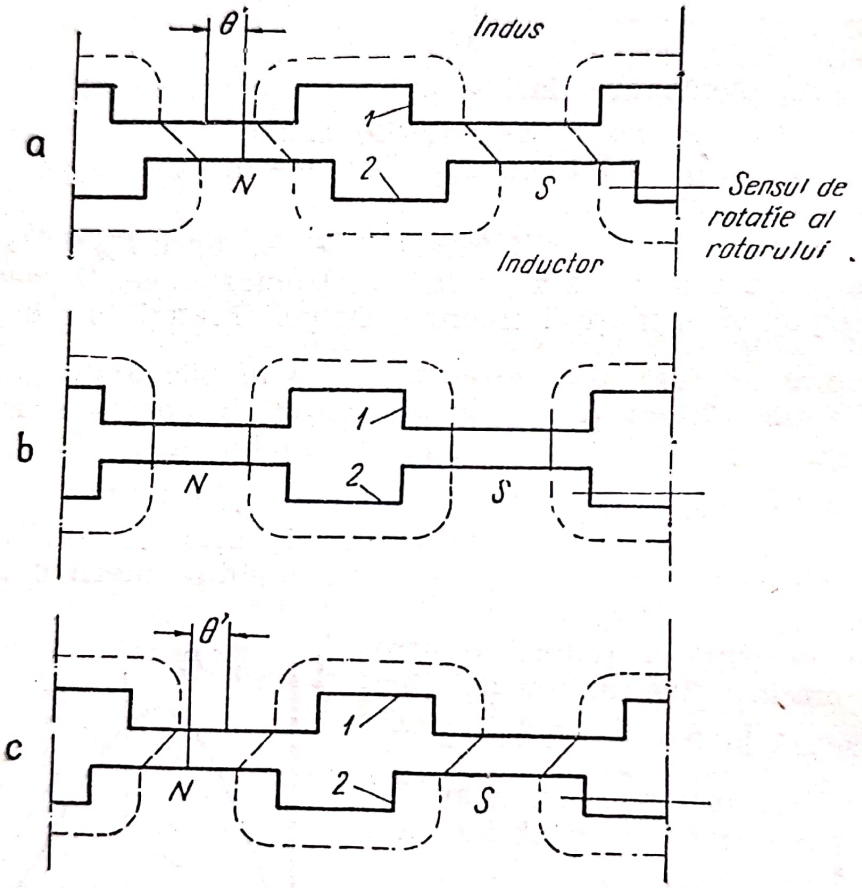


Fig. 4.6. Liniile cîmpului magnetic în întrefier și regimurile de funcționare ale mașinii sincrone:

1 — curba prin care se vizualizează polii cîmpului magnetic rezultant în întrefier; *2* — conturul inductorului; *a* — funcționare ca generator în sarcină; *b* — funcționare în gol a generatorului; *c* — funcționare ca motor.

Dacă se reduce puterea mecanică cedată generatorului pe la arbore de motorul primar, unghiul θ' începe să scadă și ca urmare scade și puterea cedată rețelei de generatorul sincron.

Cînd se ajunge la $\theta'=0$ ceea ce determină totodată $\theta=0$, generatorul este complet descărcat și motorul primar va ceda generatorului putere numai pentru acoperirea pierderilor de funcționare în gol. În

Scanned with OKEN Scanner

această situație mașina sincronă funcționează ca generator sincron în gol.

În fig. 4.6, *b* este reprezentată configurația care cuprinde polii inductori ai rotorului și curba prin care se pun în evidență polii cîmpului magnetic rezultant în întrefier, pentru funcționarea ca generator în gol.

Dacă acum se decuplează motorul primar de la arborele generatorului, rotorul începe să rămînă în urma cîmpului magnetic învîrtitor rezultant în întrefier, unghiul θ' devine negativ, iar rotorul va continua să se învîrtească cu turația cîmpului magnetic învîrtitor. Acum puterea necesară pentru acoperirea pierderilor de funcționare în gol este absorbită de la rețea. În această situație mașina sincronă funcționează ca motor sincron în gol. Acum elementul *conducător* este cîmpul magnetic rezultant în întrefier, iar elementul *condus* este rotorul. Dacă se aplică la arborele mașinii un cuplu rezistent, unghiul θ' va rămîne negativ și va crește în valoare absolută odată cu creșterea puterii absorbite de la rețea, necesară pentru acoperirea puterii mecanice la arbore. În această situație mașina sincronă funcționează ca motor sincron.

În fig. 4.6, *c* este reprezentată configurația care cuprinde polii inductori ai rotorului, curba prin care se pun în evidență polii cîmpului magnetic rezultant în întrefier și liniile cîmpului magnetic în întrefier, pentru funcționarea ca motor sincron.

Motorul sincron transformă puterea electromagnetică primită pe la borne în putere mecanică cedată pe la arbore.

Atît la funcționarea ca generator cît și la funcționarea ca motor, turația mașinii sincrone este strict legată de frecvența rețelei și are valoarea de sincronism $n_1 = \frac{60f}{p}$:

Problema cea mai dificilă pentru motorul sincron o constituie pornirea și conectarea la rețea.

4.1.6. Ecuația tensiunii motorului sincron

Se va considera inițial cazul mai complex, acela al mașinii cu poli aparenți. Fenomenele prin care sînt induse tensiunile electromotoare în înfășurarea indusului sînt aceleași ca la generator, ceea ce diferă este numai sensul acestora. Pentru mai multă claritate, în cazul motorului sincron se va utiliza regula de asociere a sensurilor de la receptor ceea ce revine la modificarea semnului $\underline{U}$. Cu această modificare ecuația (4.4) devine:

$$\underline{U} = -\underline{U}_{eo} + RI + jX_d\underline{I}_d + jX_q\underline{I}_q, \tag{4.9}$$

unde

$$I = \underline{I}_d + \underline{I}_q \tag{4.9 a}$$

iar toate notațiile au aceeași semnificație ca la generator.

Scanned with OKEN Scanner

Pentru mașina cu poli înecați sau în cazul în care în mod simplificat se neglijează inegalitatea reluctanțelor din cele două axe, se introduce $X_d = X_q = X_s$ și ecuația (4.8) iar forma simplă:

$$\underline{U} = -\underline{U}_{e0} + R\underline{I} + jX_s\underline{I}. \tag{4.10}$$

4.1.7. Diagrama de fazori a tensiunii și curenților motorului sincron

Pentru motorul sincron cu poli aparenți diagrama de fazori a tensiunilor și curenților se poate construi pe baza ecuației (4.8).

În fig. 4.7 este reprezentată diagrama de fazori a tensiunilor și curenților motorului sincron cu poli aparenți, cu factor de putere inductiv. Acest motor constituie o mașină sincronă care absoarbe de la rețea atît putere activă cît și putere reactivă.

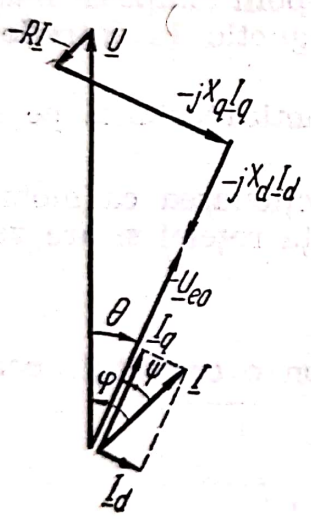


Fig. 4.7. Diagrama de fazori a tensiunilor și curenților motorului sincron cu poli aparenți, cu factor de putere inductiv.

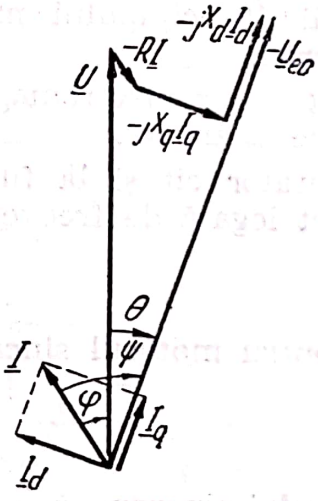


Fig. 4.8. Diagrama de fazori a tensiunilor și curenților motorului sincron cu poli aparenți, cu factor de putere capacitiv.

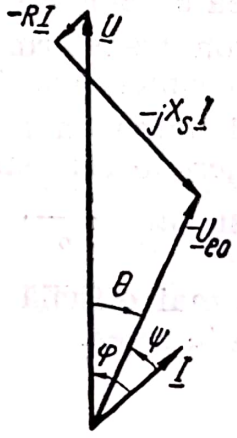


Fig. 4.9. Diagrama de fazori a tensiunilor și curenților motorului sincron cu poli înecați, cu factor de putere inductiv.

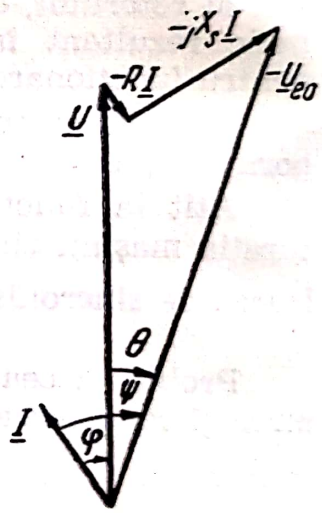


Fig. 4.10. Diagrama de fazori a tensiunilor și curenților motorului sincron cu poli înecați, cu factor de putere capacitiv.

În fig. 4.8 este reprezentată diagrama de fazori a tensiunilor și curenților motorului sincron cu poli aparenți, cu factor de putere capacitiv. Acest motor constituie o mașină sincronă care absoarbe de la rețea putere activă, dar cedează rețelei putere reactivă.

Pentru motorul sincron cu polii înecați, diagrama de fazori a tensiunilor și curenților se poate construi pe baza ecuației (4.10).

Scanned with OKEN Scanner

În figurile 4.9 și 4.10 sînt reprezentate diagramele de fazori ale tensiunilor și curenților motorului sincron cu poli înecați, cu factor de putere inductiv respectiv capacitiv.

Din diagramele de fazori reprezentate în figurile 4.7 și 4.8 sau în figurile 4.9 și 4.10 rezultă că pentru ca un motor sincron să funcționeze cu un factor de putere capacitiv, adică să cedeze putere reactivă rețelei este necesar să fie supraexcitat (figurile 4.8 și 4.10). Dacă motorul este subexcitat atunci funcționează cu un factor de putere inductiv, adică absoarbe putere activă de la rețea (figurile 4.7 și 4.9).

Din aceleași diagrame de fazori reiese că în cazul în care motorul cedează rețelei putere reactivă, reacția indusului are un caracter demagnetizant, iar în cazul în care motorul absoarbe de la rețea putere reactivă, reacția indusului are un caracter magnetizant.

Fenomenele referitoare la reacția indusului la motor sînt aceleași ca la generator. Refăcînd studiul efectuat pentru generatorul sincron se găsesc concluzii asemănătoare; ceea ce diferă este sensul cîmpului.

Cînd curentul din indus $\underline{I}$ este în fază cu tensiunea electromotoare $-\underline{U}_{eo}$, reacția indusului este transversală și are ca efect întărirea inducției magnetice sub marginea de intrare a polului și slăbirea inducției magnetice sub marginea de ieșire a polului.

Cînd curentul $\underline{I}$ este inductiv față de tensiunea electromotoare $-\underline{U}_{eo}$, reacția indusului este longitudinală și are un efect magnetizant.

Cînd curentul $\underline{I}$ este capacitiv față de tensiunea electromotoare $-\underline{U}_{eo}$, reacția indusului este longitudinală și are un efect demagnetizant.

4.1.8. **Puterea electromagnetică a motorului sincron**

Deducerea expresiei cuplului motorului sincron se poate face în mod asemănător ca pentru generatorul sincron. Se poate utiliza chiar expresia puterii electromagnetice a generatorului sincron, introducînd însă mărimile corespunzătoare funcționării în regim de motor. La funcționarea ca motor unghiul θ are, după cum s-a arătat, valori negative. Puterea electromagnetică rezultă în acest caz negativă, deoarece reprezintă o putere absorbită de la rețea și s-a considerat pozitivă puterea cedată rețelei.

Se va nota aici cu P_M puterea electromagnetică absorbită de la rețea și cu θ valoarea absolută a unghiului intern. Urmează că expresia puterii electromagnetice absorbite de motor de la rețea rezultă din expresia stabilită pentru generator înlocuind P_M prin $-P_M$. Astfel puterea electromagnetică a motorului sincron cu poli aparenți, dacă se neglijează rezistența indusului, este:

$$P_M = m\frac{UU_{eo}}{X_d}\sin\theta + m\frac{1}{2}U^2\left(\frac{1}{X_q}-\frac{1}{X_d}\right)\sin 2\theta \qquad (4.11)$$

iar pentru motorul cu poli înecați:

$$P_M = m\frac{UU_{eo}}{X_d}\sin\theta. \qquad (4.12)$$

Scanned with OKEN Scanner

Ca și la generator, primul termen al expresiei (4.11) se numește componenta principală a puterii electromagnetice, iar al doilea se numește componenta auxiliară a puterii electromagnetice.

Cuplul electromagnetic este

$$M=\frac{P_M}{\Omega_s}. \tag{4.13}$$

Puterea sincronizantă specifică pentru cele două situații este

$$P_s=m\frac{UU_{eo}}{X_d}\cos\theta+mU^2\left(\frac{1}{X_q}-\frac{1}{X_d}\right)\cos 2\theta \tag{4.14}$$

respectiv

$$P_s=m\frac{UU_{eo}}{X_d}\cos\theta. \tag{4.15}$$

Din expresia (4.11) a puterii electromagnetice a motorului sincron, rezultă că și în cazul în care curentul de excitație este nul, deci $U_{eo}=0$, totuși motorul dezvoltă un cuplu diferit de zero, dacă are poli aparenți, deoarece $X_d\neq X_q$ și termenul al doilea din expresia puterii electromagnetice este diferit de zero.

Motorul sincron, neexcitat, conectat la rețea, produce un cuplu electromagnetic, deoarece liniile cîmpului magnetic de reacție a indusului tind să treacă prin rotor după drumul de reluctanță mai mică, deci după axa longitudinală.

Ca și în cazul generatorului, neuniformitatea întrefierului, adică anizotropia de formă a întrefierului, este aici cauza producerii cuplului electromagnetic.

Dacă $X_d=X_q$, atunci motorul sincron dezvoltă un cuplu electromagnetic numai atunci cînd este excitat.

4.1.9. **Pornirea motorului sincron**

Motorul sincron nu poate porni singur, de aceea este necesar să fie prevăzut cu mijloace care să permită să fie adus la turația de sincronism sau în apropierea acesteia.

În adevăr, cuplul electromagnetic va avea totdeauna același sens numai la turația de sincronism. Dacă statorul ar fi conectat la rețeaua de curent alternativ cînd rotorul este imobil, iar înfășurarea de excitație este alimentată în curent continuu, atunci se va produce un cuplu electromagnetic, datorită interacțiunii cîmpului magnetic imobil al polilor rotorici cu cîmpul magnetic învîrtitor al statorului. Valoarea instantanee a acestui cuplu va schimba de sens de două ori într-o perioadă de rotație a cîmpului magnetic învîrtitor, în cazul unei mașini bipolare. Pe o jumătate a perioadei va avea un sens pe cealaltă jumătate alt sens. Valoarea medie a cuplului electromagnetic este nulă. Acest rezultat poate fi obținut și în expresia puterii electromagnetice. În acest caz

Scanned with OKEN Scanner

unghiul intern θ din expresia lui P_M este de forma $\theta_0+\omega t$. Rezultă că valoarea medie a lui P_M deci și a cuplului electromagnetic M este nulă.

Cuplul electromagnetic fiind nul motorul nu poate porni. De aceea, pentru a pune în funcție un motor sincron, acesta trebuie adus mai întîi la turația de sincronism sau în apropierea de aceasta.

Pentru pornirea motoarelor sincrone se utilizează diferite metode care vor fi expuse în continuare.

Metode de pornire cu un motor auxiliar. Motorul sincron este pornit cu ajutorul unui motor electric auxiliar, cuplat pe același arbore și este adus pînă la turația de sincronism. Apoi motorul electric auxiliar este deconectat de la rețea, iar motorul sincron este conectat la rețea, după ce mai întîi s-au verificat condițiile de conectare la rețea cu ajutorul unui sincronoscop.

Ca motor auxiliar se utilizează mai ales un motor asincron care are cu o pereche de poli mai puțin decît motorul sincron. Turația motorului auxiliar este astfel puțin mai mare decît aceea a motorului sincron, astfel încît după deconectare, cînd turația motorului auxiliar scade, se ajunge pînă la valoarea de sincronism. Dacă pornirea motorului sincron se face în gol, este necesar ca puterea motorului auxiliar să reprezinte 10—15% din puterea motorului sincron.

Metoda prezintă inconvenientul că instalația necesită un motor în plus și astfel complică și mărește costul instalației.

Datorită deficiențelor pe care le are, metoda nu mai este practic utilizată în prezent. Ca o excepție, este aplicată la pornirea compensatoarelor sincrone de putere mare, care dacă ar fi pornite printr-o altă metodă, ar necesita un curent inadmisibil de mare pentru rețea.

Metoda de pornire în asincron. Aceasta este metoda de pronire cea mai utilizată.

Procesul de pornire în asincron a motorului sincron are două etape: pornirea în asincron propriu-zisă și intrarea în sincronism. Aceste două etape vor fi examinate pe rînd.

Pornirea în asincron. Pentru ca un motor să poată porni în asincron este necesar să fie prevăzut cu colivie sau cu poli masivi pe rotor. Acestea au rolul coliviei de la motorul asincron. Colivia de pornire se numește și înfășurare de pornire. Constructiv înfășurarea de pornire nu diferă de înfășurarea de amortizare, o aceeași înfășurare avînd ambele roluri.

După conectarea la rețea, motorul sincron va porni în asincron, întocmai ca un motor asincron cu colivie.

În timpul pornirii în asincron, înfășurarea de excitație se conectează în scurtcircuit, sau se conectează pe o rezistență care are aproximativ de nouă ori valoarea rezistenței de excitație. Dacă înfășurarea de excitație ar fi lăsată deschisă, tensiunile electromotoare induse în circuitul de excitație la pornire ar putea produce la bornele circuitului de excitație tensiuni ridicate, care ar putea provoca străpungerea izolației conductoarelor înfășurării de excitație.

Intrarea în sincronism. Cînd durata pornirii în asincron propriu-zise s-a încheiat, motorul a ajuns la o turație apropiată de valoarea de

Scanned with OKEN Scanner

sincronism. Atunci se conectează tensiunea continuă la bornele înfășurării de excitație. Datorită interacțiunii dintre cîmpul de excitație rotoric și cîmpul învîrtitor statoric se produce un cuplu electromagnetic, corespunzător mașinii sincrone excitate. Suprapunerea acestui cuplu peste cuplul asincron determină apariția unor oscilații ale turației, care fac nu numai să se atingă turația de sincronism, dar să fie și depășită pentru scurte intervale de timp. Cînd turația a atins această valoare, motorul intră în sincronism după mai multe oscilații ale turației în jurul valorii de sincronism.

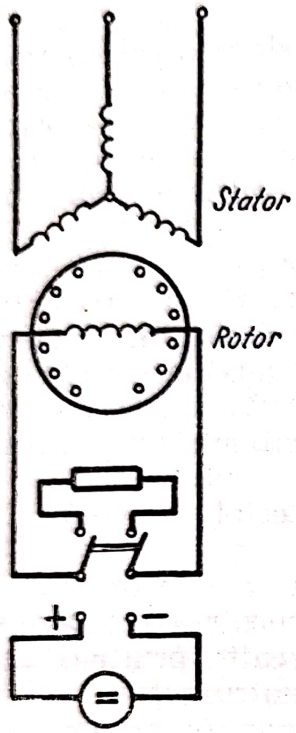


Fig. 4.11. Schema pentru pornirea în asincron a motorului sincron, cu conectare directă la rețea.

Cu cît cuplul rezistent este mai mic, cu atît alunecarea la sfîrșitul pornirii în asincron este mai mică și cu atît intrarea în sincronism se face mai ușor, cu oscilații mai mici. Uneori la pornirea în gol este posibilă intrarea în sincronism a motorului chiar neexcitat, sub acțiunea componentei auxiliare a cuplului electromagnetic al motorului sincron.

În fig. 4.11 este reprezentată schema motorului sincron la pornirea în asincron cu conectare directă la rețea.

4.2. DETERMINAREA CURBEI CUPLULUI DE PORNIRE ÎN ASINCRON A MAȘINII SINCRONE CUNOSCÎND PARAMETRII ELECTRICI

Cuplul asincron al mașinii sincrone este produs de colivia de pornire dispusă în poli rotorici [2, 8]. Colivia de pornire poate fi de trei tipuri constructive [2]: colivie longitudinal-transversală, colivie longitudinală, colivie transversală (fig. 4.12).

Spre deosebire de motorul asincron, pe rotorul motorului sincron există în plus înfășurarea de excitație. Circuitul magnetic este nesimetric, din cauza existenței polilor și spațiilor interpolare.

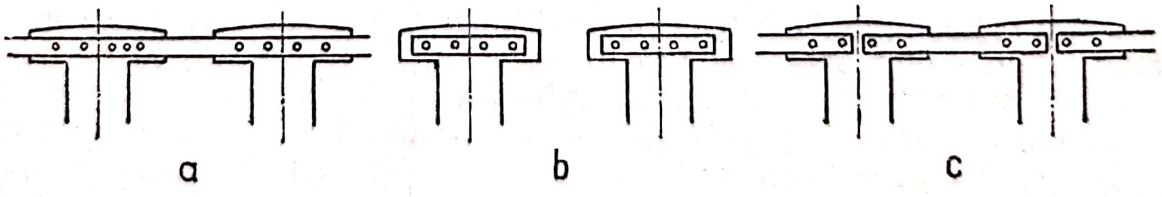


Fig. 4.12. Tipurile constructive ale coliviei de pornire:
a — colivie longitudinal-transversală; *b* — colivie longitudinală; *c* — colivie transversală.

Spre deosebire de pornirea motorului asincron, pornirea motorului sincron se efectuează în două etape.

În prima etapă motorul sincron ajunge sub acțiunea cuplului asin-

cron în apropierea turației de sincronism. Turația, respectiv alunecarea, la funcționarea stabilizată la sfîrșitul acestei etape, se determină la intersecția curbelor care reprezintă dependența de alunecare a cuplurilor motor și rezistent.

În a doua etapă se produce intrarea în sincronism a motorului sincron, sub acțiunea cuplului sincron determinat de înfășurarea de excitație alimentată în curent continuu și de inegalitatea reactanțelor longitudinală și transversală.

Cercetările teoretice și experimentale au arătat că intrarea motorului în sincronism se realizează mai sigur dacă alunecarea în regim asincron stabilizat are o valoare mică.

De aceea, durata pornirii motorului sincron și condițiile dinaintea intrării în sincronism sînt determinate practic de caracterul dependenței cuplului asincron al motorului sincron de alunecare.

Deoarece pe rotorul mașinii sincrone sînt dispuse două înfășurări (colivia de pornire și înfășurarea de excitație), mașina sincronă la funcționarea în asincron poate fi tratată ca o mașină asincronă cu rotorul cu dublă colivie, unde fiecare din cele două colivii reprezintă o înfășurare nesimetrică. Astfel, înfășurarea de excitație reprezintă o înfășurare monofazată, adică cu nesimetrie totală. Înfășurarea constituită de colivia de pornire, deoarece are bare numai pe piesa polară dar nu și în spațiile interpolare, reprezintă de asemenea o înfășurare nesimetrică, dar cu o nesimetrie parțială. În plus, circuitul magnetic fiind nesimetric, reactanțele înfășurărilor de pe rotor vor fi diferite în axele longitudinală și transversală. Prin urmare, mașina sincronă la funcționarea în asincron se prezintă ca o mașină asincronă cu rotor în dublă colivie, avînd înfășurările rotorice nesimetrice din punct de vedere electromagnetic. Ca urmare, fenomenele care apar aici sînt analoge celor tratate la studiul mașinilor asincrone cu circuitul secundar nesimetric.

Prin urmare, la funcționarea în asincron a mașinii sincrone apar următoarele particularități:

cîmpul magnetic din întrefier are două componente, una care se rotește în sens direct, alta care se rotește în sens invers;

în circuitul statoric apare în afara curentului de frecvență f, un curent de o frecvență diferită f_i și anume, dacă alunecarea este $s<0{,}5$, atunci $f_i=(1-2s)f$ iar dacă alunecarea este $s>0{,}5$, atunci $f_i=(2s-1)f$;

cuplul electromagnetic dat de motor are două componente, una dată de componenta cîmpului magnetic care se învîrtește în sensul direct și cealaltă dată de componenta cîmpului magnetic care se învîrtește în sens invers. Deoarece a doua componentă a cuplului este caracteristică mașinilor asincrone cu rotorul monofazat sau mașinilor sincrone care au pe rotor numai înfășurare de excitație, adică înfășurare numai în axa longitudinală, se numește cuplul legăturii monoaxiale. Din același motiv, legătura dintre circuitul statoric și circuitul de excitație se numește legătură monoaxială;

cuplul legăturii monoaxiale produce o adîncitură în curba cuplului, la o turație în apropiere de jumătate din turația de sincronism, adică pentru $s=0{,}5$.

Scanned with OKEN Scanner

Pentru a reduce cuplul monoaxial este necesar să se introducă în circuitul de excitație o rezistență de valoare convenabilă.

Înfășurarea de pornire se realizează fie dispunînd o colivie în polii rotorului, fie realizînd polii rotorului din oțel masiv.

Atît la motoarele sincrone cu colivie de pornire cît și la motoarele sincrone cu poli masivi, cuplul electromagnetic produs de înfășurarea legăturii monoaxiale nu este esențial.

La mașinile cu polii realizați din tole și fără colivie de pornire, efectul legăturii monoaxiale este însă deosebit de mare, cuplul monoaxial este de asemenea important, iar adîncitura din curba cuplului la alunecări vecine cu $s=0{,}5$ poate fi mare, astfel încît cuplul să ia chiar valori negative. Ca urmare, motorul sincron nu poate ajunge în acest caz, la pornirea în asincron, în apropiere de sincronism, ci rămîne la o turație apropiată de jumătate din turația de sincronism.

O situație apropiată de aceasta se produce în cazul cînd mașina este prevăzută cu înfășurare de pornire longitudinală sau cînd este prevăzută cu înfășurare de pornire transversală, iar înfășurarea de excitație este deschisă. De aceea se utilizează în general în construcția de mașini sincrone colivia longitudinal-transversală.

Cuplul electromagnetic rezultant este suma a două componente, una corespunzătoare cuplului dat de cîmpul direct, care are față de stator viteza unghiulară $\frac{\omega}{p}$, alta corespunzătoare cuplului dat de cîmpul invers care are față de stator viteza unghiulară $(2s-1)\frac{\omega}{p}$. Cuplul rezultant are de aceea două componente: o componentă medie și o componentă pulsatorie de pulsație $2s\omega$, deci de frecvența $2sf$.

Valoarea medie a componentei pulsatorii este nulă, de aceea se va examina în continuare numai componenta medie.

Dacă parametrii electrici ai mașinii sincrone sînt cunoscuți, se poate calcula valoarea medie a cuplului asincron și valoarea eficace a curentului statoric cu formulele uzuale.

4.2.1. **Rotorul cu colivie**

Se calculează succesiv:

$$\underline{Z}_{ad}=\frac{1}{\frac{1}{\mathrm{j}X_{ad}}+\frac{1}{\frac{Rf}{s}+\mathrm{j}X_{\sigma f}}+\frac{1}{\frac{R_{Dd}}{s}+\mathrm{j}X_{\sigma Dd}}} \tag{4.16}$$

$$\underline{Z}_{aq}=\frac{1}{\frac{1}{\mathrm{j}X_{aq}}+\frac{1}{\frac{R_{Dq}}{s}+\mathrm{j}X_{\sigma Dq}}}; \tag{4.17}$$

Scanned with OKEN Scanner

$$\underline{Z}_{d1}=\underline{Z}_{ad}+R_1+\mathrm{j}X_\sigma; \tag{4.18}$$

$$\underline{Z}_{q1}=\underline{Z}_{aq}+R_1+\mathrm{j}X_\sigma; \tag{4.19}$$

$$\underline{Z}_{d3}=\underline{Z}_{d1}+\frac{2R_1(1-s)}{2s-1}; \tag{4.20}$$

$$\underline{Z}_{q3}=\underline{Z}_{q1}+\frac{2R_1(1-s)}{2s-1}; \tag{4.21}$$

$$\underline{I}_1=\underline{U}_1\frac{\underline{Z}_{d3}+\underline{Z}_{q3}}{\underline{Z}_{d1}\underline{Z}_{q3}+\underline{Z}_{d3}\underline{Z}_{q1}}; \tag{4.22}$$

$$\underline{I}_3=-\underline{U}_1\frac{\underline{Z}_{d1}-\underline{Z}_{q1}}{\underline{Z}_{d1}\underline{Z}_{q3}+\underline{Z}_{d3}\underline{Z}_{q1}}; \tag{4.23}$$

$$I=\sqrt{I_1^2+I_3^2} \tag{4.24}$$

$$R_{2e}+\mathrm{j}X_{2e}=\frac{1}{2}\left[(\underline{Z}_{ad}+\underline{Z}_{aq})-\frac{(\underline{Z}_{ad}-\underline{Z}_{aq})^2}{\underline{Z}_{d3}+\underline{Z}_{q3}}\right]: \tag{4.25}$$

$$M=R_{2e}I_1^2+\frac{R_1}{2s-1}I_3^2, \tag{4.26}$$

unde s-au folosit notațiile obișnuite: R_1 — rezistența statorului; X_σ — reactanța de scăpări a circuitului statoric; X_{ad} — reactanța circuitului magnetizant longitudinal; X_{aq} — reactanța circuitului magnetizant transversal; R_f — rezistența circuitului de excitație inclusiv rezistența de pornire; $X_{\sigma f}$ — reactanța de scăpări a circuitului de excitație; R_{Dd} — rezistența longitudinală a înfășurării de pornire; $X_{\sigma Dd}$ — reactanța de scăpări longitudinale a înfășurării de pornire; R_{Dq} — rezistența transversală a înfășurării de pornire; $X_{\sigma Dq}$ — reactanța de scăpări transversală a înfășurării de pornire; toți parametrii sînt raportați la stator.

La pornirea în asincron a mașinii sincrone, calculele, deși în principiu simple, sînt însă destul de anevoioase, de aceea aplicarea formulelor trebuie făcută cu ajutorul unei mașini electronice numerice de calcul; se poate utiliza chiar o mașină de calcul electronică numerică de birou.

La pornirea motoarelor sincrone în asincron este recomandabil ca circuitul de excitație să fie închis pe o rezistență, denumită rezistență de pornire, din două motive: se micșorează cuplul monoaxial care produce o adîncitură în curba cuplului între anumite limite, micșorarea fiind cu atît mai pronunțată cu cît rezistența de pornire este mai mare; tensiunea mare care se induce la pornire la bornele circuitului de excitație, poate duce la pericole de accidentare pentru personal sau poate produce străpungerea izolației înfășurării de excitație sau a inelelor de contact la care sînt legate bornele înfășurării de excitație. Dacă la bornele înfășurării de excitație este legată însă o rezistență, atunci tensiunea electromotoare indusă stabilește în circuitul de excitație un curent, care determină la bornele înfășurării de excitație o cădere de tensiune cu atît mai mică cu cît rezistența de pornire este mai mică.

Scanned with OKEN Scanner

După cum se vede, valoarea rezistenței este determinată de două condiții: una impune o valoare cît mai mică, alta o valoare ceva mai mare. S-a constatat că în general cel mai convenabil lucru este să se adopte pentru rezistența de pornire o valoare de aproximativ $9\,R_{f0}$, unde R_{f0} este rezistența proprie a înfășurării de excitație.

Pentru a pune în evidență forma curbelor cuplului și curentului mașinii sincrone cu colivie de pornire la pornirea în asincron, în fig. 4.13 și 4.14 se dau după [41] curbele reprezentative ale cuplului și curentului în funcție de alunecare $M=F(s)$ și $I=f(s)$ pentru trei situații ale circuitului de excitație și anume: circuitul de excitație deschis, circuitul de excitație închis pe o rezistență, circuitul de excitație scurtcircuitat.

Datele mașinii sincrone sînt următoarele:
$P_N=630$ kVA; $U_N=6\,000$ V (între faze); $I_N=64$ A; $f=50$ Hz; $n=750$ rot/min; conexiune Y; randament $\eta=0{,}94$; cos $\varphi=0{,}90$; tensiune nominală de excitație $U_f=58$ V; curent nominal de excitație $I_f=160$ A. Colivia rotorului este de tipul longitudinal — transversală, barele coliviei sînt din alamă, iar inelele de conexiune din cupru.

Rezistența de pornire a fost $R_{sf}=3\,\Omega$, astfel încît $R_f=10{,}4\,R_{f0}$.

Comparînd curbele cuplului din fig. 4.13, rezultă următoarele: valoarea cuplului de pornire nu este practic influențată de valoarea rezistenței de pornire; cuplul monoaxial produce o adîncitură însemnată în curba cuplului, dacă circuitul de excitație este deschis, dar are o influență mică dacă circuitul de excitație este închis pe o rezistență. Deoarece operația de sincronizare se începe după ce s-a terminat pornirea, punctul stabil de funcționare obținut pe caracteristica $M=f(s)$ cînd s-a terminat pornirea se numește punct de intrare în sincronism.

Pentru o valoare dată a cuplului rezistent, valoarea cuplului la sfîrșitul pornirii, adică punctul de funcționare stabilă de pe caracteristica $M=f(s)$ este diferită de cele trei cazuri date în fig. 4.13.

De exemplu, pentru un cuplu rezistent constant, în raport cu alunecarea și avînd valoarea de 20%, adică 0,2 din valoarea cuplului nominal, se obțin următoarele valori ale alunecării de intrare în sincronism: $s=0{,}06$ pentru curba *1*; $s=0{,}04$ pentru curba *2*; $s=0{,}1$ pentru curba *3*.

Rezultă că situația cea mai favorabilă, adică cu alunecarea de intrare în sincronism cea mai mică, se realizează în cazul cînd înfășurarea de excitație este închisă pe o rezistență de pornire.

Este necesar să se menționeze aici că valoarea cuplului nu crește proporțional cu pătratul tensiunii, odată cu creșterea tensiunii, ci crește mult mai încet. De exemplu, dacă se ridică experimental curba cuplului la tensiunea de linie $U=1200$ V și se recalculează la tensiunea de linie $U=3000$ V, admițînd proporționalitatea cuplului cu pătratul tensiunii, se obține o valoare cu 40% mai mică decît valoarea reală. Motivul acestei diferențe este saturația istmului crestăturilor în care sînt dispuse barele coliviei.

Deoarece la pornire curenții în aceste bare sînt foarte mari, și saturația este importantă.

Scanned with OKEN Scanner

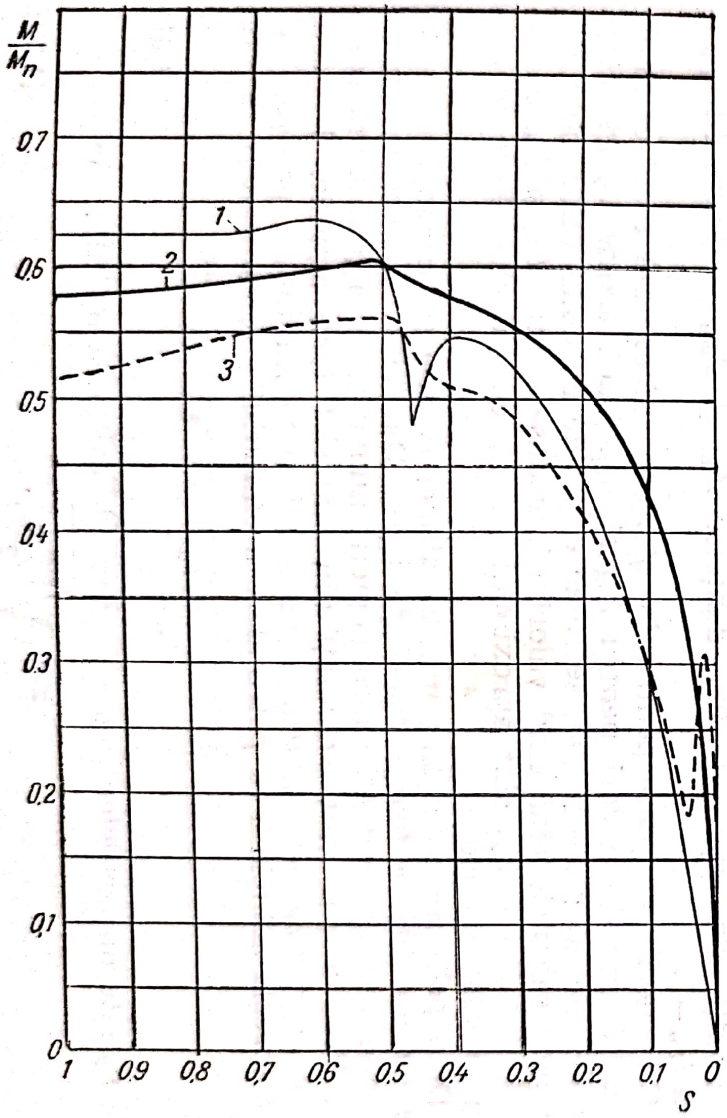


Fig. 4.13. Caracteristica cuplului în funcție de alunecare, în cazurile:

1 — înfășurarea de excitație deschisă; *2* — înfășurarea de excitație închisă pe o rezistență de pornire; *3* — înfășurarea de excitație scurtcircuitată, tensiune redusă.

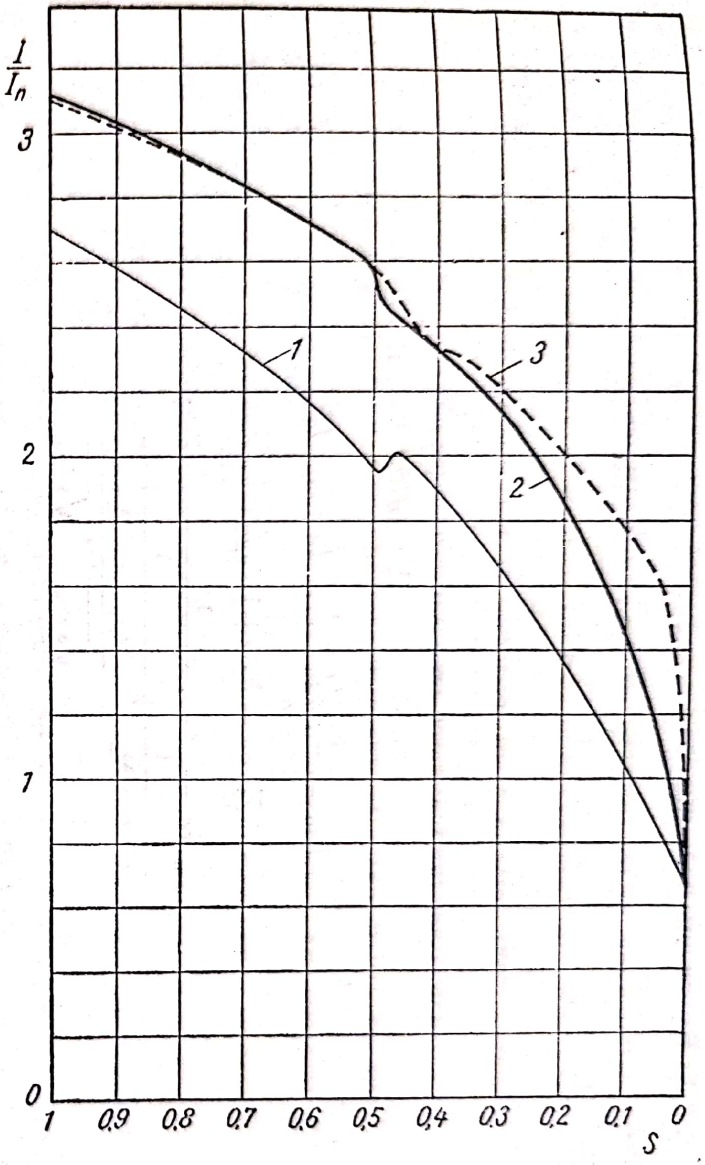


Fig. 4.14. Caracteristica curentului în funcție de alunecare, în cazurile:

1 — înfășurarea de excitație deschisă; *2* — înfășurarea de excitație închisă pe o rezistență; *3* — înfășurarea de excitație scurtcircuitată, tensiune redusă.

Scanned with OKEN Scanner

4.2.2. Rotor cu poli masivi

Se calculează analog ca la punctul precedent cu deosebirea că relațiile (4.16) și (4.17) se înlocuiesc prin

$$\underline{Z}_{ad}=\frac{1}{\frac{1}{jX_{ad}}+\frac{1}{\frac{R_f}{s}+jX_{\sigma f}}+\frac{1}{\frac{R_{Dd}}{\sqrt{s\,I_{Dd}}}+j\frac{X_{\sigma\,Dd}}{\sqrt{s\,I_{Dd}}}}}; \tag{4.27}$$

unde

$$I_{Dd}=\left|\frac{Z_{ad}\,I_d}{Z_{Dd}}\right|; \qquad \underline{I}_d=\underline{I}_1+\underline{I}_3; \tag{4.28}$$

$$\underline{Z}_{\sigma\,Dd}=R_{Dd}+jX_{\sigma\,dD}; \tag{4.29}$$

$$\underline{Z}_{aq}=\frac{1}{\frac{1}{jX_{aq}}+\frac{1}{\frac{R_{Dq}}{\sqrt{s\,I_{Dq}}}+j\frac{X_{\sigma\,Dq}}{\sqrt{s\,I_{Dq}}}}};$$

unde

$$I_{Dq}=\left|\frac{I_q}{\frac{1}{jX_{aq}}+\frac{1}{Z_{\sigma\,Dq}}}\cdot\frac{1}{Z_{\sigma\,Dd}}\right|; \qquad \underline{I}_q=-j\underline{I}_1+j\underline{I}_3; \tag{4.30}$$

$$\underline{Z}_{\sigma\,Dq}=R_{Dq}+jX_{\sigma\,Dq}$$

Pentru a efectua calculele, se adoptă inițial o valoare oarecare pentru curenții din expresiile impedanțelor Z_{ad} și Z_{aq}, de exemplu $I_{Dd}=1$ și $I_{Dq}=1$.

Cu valorile adoptate pentru I_{Dd} și I_{Dq} se efectuează toate calculele și rezultă anumite valori pentru I_{Dd} și I_{Dq}. Dacă aceste valori diferă mult de cele adoptate inițial, se refac calculele cu noile valori obținute. Se repetă calculele pînă cînd valorile introduse pentru I_{Dd} și I_{Dq} în expresiile lui Z_{ad} și Z_{aq} sînt aproximativ egale cu valorile găsite în calculul imediat anterior.

Dacă polii rotorului sînt masivi, atunci aceștia se prezintă ca o colivie cu un număr foarte mare de bare. Dar cîmpul electromagnetic pătrunde într-un conductor feromagnetic numai pînă la o anumită adîncime. Polii masivi sînt executați din material feromagnetic, de aceea cîmpul electromagnetic pătrunde pe o adîncime limitată a polilor.

Expresia adîncimii la pătrundere a cîmpului electromagnetic în oțel este

$$Z_k=\frac{k_y}{\alpha_e}, \tag{4.31}$$

unde k_y este un coeficient, care depinde de calitatea oțelului, iar

$$\alpha_e=\sqrt{\frac{\omega\sigma\,\mu_e}{2}}, \tag{4.32}$$

Scanned with OKEN Scanner

unde $\omega = 2\pi f_2 = 2\pi fs$ este pulsația cîmpului electromagnetic în raport cu rotorul, σ este conductivitatea electrică a oțelului iar μ_e este permeabilitatea magnetică a oțelului. Din expresia adîncimii de pătrundere se vede că aceasta este cu atît mai mare cu cît frecvența este mai mică și cu cît permeabilitatea magnetică a oțelului este mai mică.

Permeabilitatea magnetică a oțelului este aproximativ invers proporțională cu pătura de curent, deci cu intensitatea curentului.

Prin urmare, parametrii înfășurării de pornire constituite de polii masivi sînt invers proporționali cu alunecarea și curentul.

Pentru a arăta forma curbelor cuplului și curentului mașinii sincrone cu poli masivi la pornirea în asincron, în figurile 4.15 și 4.16 se dau curbele reprezentative ale cuplului și curentului $M=F(s)$ și $I=f(s)$ ale unui motor sincron cu poli masivi, pentru trei situații ale circuitului de excitație și anume: circuitul de excitație deschis; circuitul de excitație închis pe o rezistență; circuitul de excitație scurtcircuitat.

Datele mașinii sînt următoarele:
$P_N=320$ kW; tensiunea de linie $U=6\,000$ V; $I_N=33{,}5$ A; $f=50$ Hz; conexiunea Y $\cos\varphi=1$; $n=750$ rot/min;

Există două variante constructive: cu și fără inele de conexiune. Inelele de conexiune se montează cu șuruburi sau prin sudură pe părțile frontale ale pieselor polare pe care le leagă galvanic între ele.

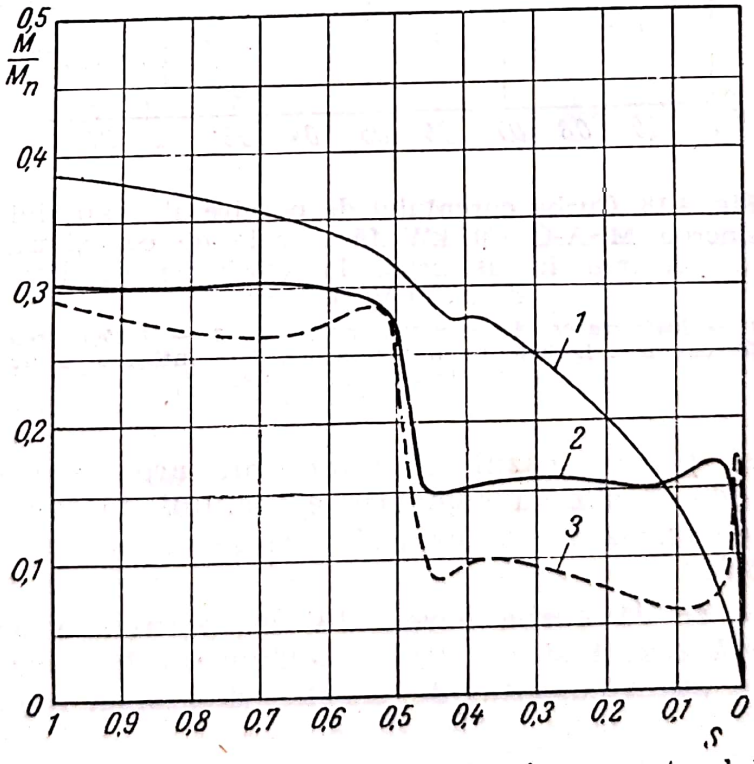


Fig. 4.15. Curba cuplului de pornire a motorului sincron MSA-G-320 kW fără inele de conexiune, la pornirea în asincron, la tensiunea de linie de 3 000 V, pentru:

1 — înfășurarea de excitație deschisă; *2* — înfășurarea de excitație închisă pe o rezistență; *3* — înfășurarea de excitație scurtcircuitată.

Scanned with OKEN Scanner

Pentru a pune în evidenţă rolul inelelor de conexiune care leagă între ele părţile frontale ale pieselor polare, în fig. 4.17 se dă după lucrarea [9] curba cuplului de pornire a motorului sincron MSA-G-320 kW cu înfăşurarea de excitaţie închisă pe o rezistenţă, la tensiunea de linie de 3 500 V, atît pentru cazul cînd motorul nu are inele de conexiune

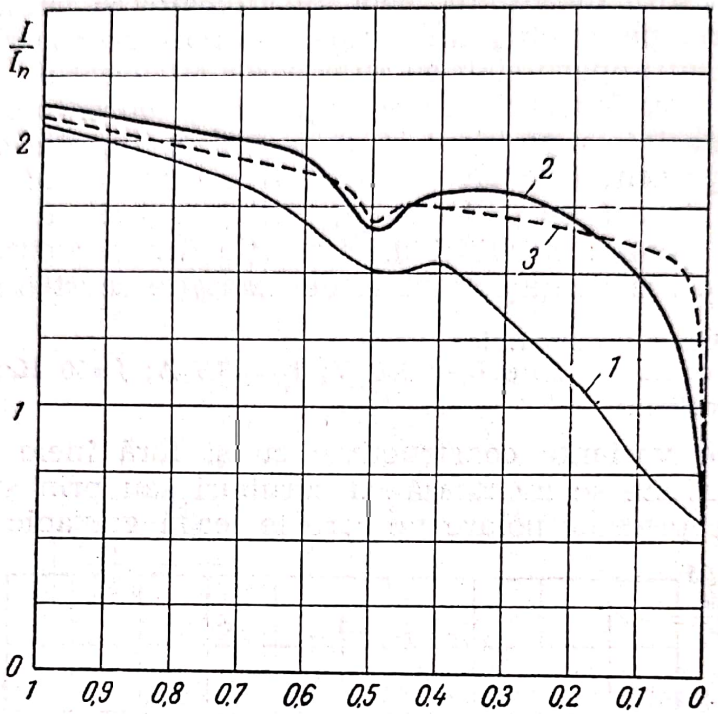


Fig. 4.16. Curba curentului de pornire al motorului sincron MSA-G-320 kW fără inele de conexiune, la pornirea în asincron, la tensiunea de linie de 3 000 V, pentru:

1 — înfăşurarea de excitaţie deschisă; *2* — înfăşurarea de excitaţie închisă pe o rezistenţă; *3* — înfăşurarea de excitaţie scurtcircuitată.

(curba *1*), cît şi pentru cazul cînd motorul are inele de conexiune (curba *2*). Se vede că simpla adăugare a inelului de conexiune măreşte cuplul maxim cu aproximativ 30% şi face să crească cuplul minim de la 0,1 M_n la 0,2 M_n.

În fig. 4.18 se dă curba curentului de pornire a aceluiaşi motor pentru cele două cazuri şi rezultă că adăugarea inelelor de conexiune măreşte doar cu puţin curentul de pornire şi anume, numai cu aproximativ 10%.

Valorile alunecării şi cuplului de intrare în sincronism nu sînt practic modificate de prezenţa inelelor de conexiune.

Comparînd curbele cuplului din fig. 4.15, rezultă următoarele: cuplul de pornire nu este influenţat sensibil de rezistenţa introdusă în circuitul de excitaţie; în schimb, restul formei curbei cuplului este sen-

Scanned with OKEN Scanner

sibil influențată de rezistența introdusă în circuitul de excitație. Pentru un cuplu rezistent constant, în raport cu alunecarea și avînd valoarea de 20% alunecarea corespunzătoare punctului de funcționare stabil este: $s=0,2$ în cazul circuitului de excitație deschis; $s=0,49$ în cazul circuitului de excitație închis pe o rezistență; $s=0,5$ în cazul circuitului de

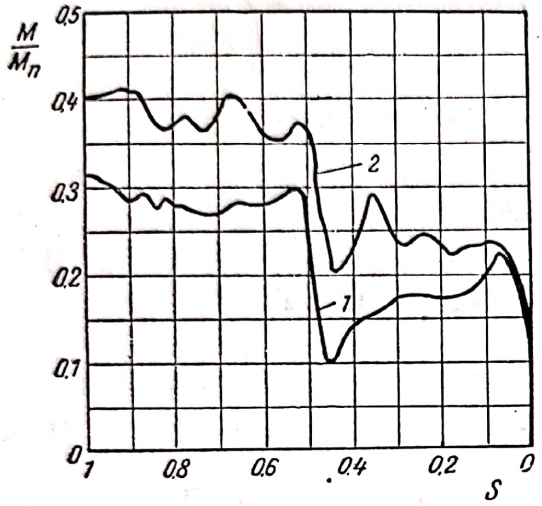


Fig. 4.17. Curba cuplului de pornire al motorului MSA-G-320 kW, cu înfășurarea de excitație închisă pe o rezistență, la tensiunea de linie de 3 500 V:
1 — pentru motorul fără inele de conexiune; *2* — pentru motorul cu inele de conexiune (de scurtcircuitare a polilor masivi).

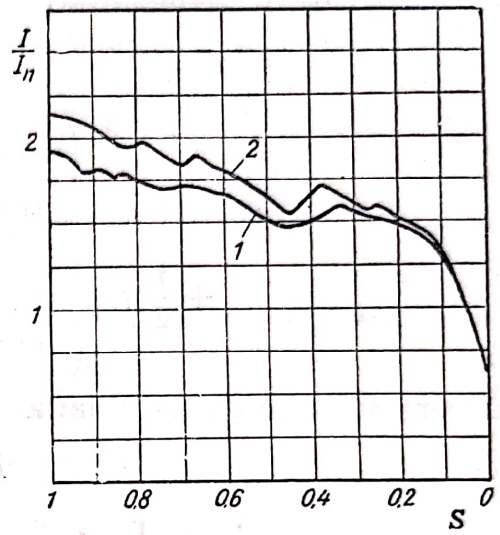


Fig. 4.18. Curba curentului de pornire al motorului MSA-G-320 kW cu înfășurarea de excitație închisă pe o rezistență, la tensiunea de linie de 3 500 V:
1 — pentru motorul fără inele de conexiune; *2* — pentru motorul cu inele de conexiune.

excitație scurtcircuitat. Valoarea alunecării este mai mare decît aproximativ $s=0,05$, adică $s=5\%$, valoare la care se admite că este în general posibilă intrarea în sincronism; deci în cazurile examinate nu este posibilă intrarea în sincronism a motorului sincron. În cazul în care cuplul rezistent are valoarea de 10%, pornirea este posibilă în cazul circuitului de excitație deschis cînd $s=0,05$ și în cazul circuitului de excitație închis pe o rezistență cînd $s=0,01$.

Prin urmare, cazul cel mai favorabil pentru a realiza intrarea în sincronism a motorului sincron cu rotorul cu poli masivi este acela cînd înfășurarea de excitație este închisă pe o rezistență de aproximativ nouă ori valoarea rezistenței proprii a înfășurării de excitație.

Prevederea mașinii cu inele de conexiune mărește mult valoarea cuplului minim, deci ameliorează condițiile de pornire. Totuși este necesar să se aibă în vedere că, în cazul cînd se prevede rotorul cu inele de conexiune, este necesar să se realizeze un contact cît mai bun între inel și piesele polare, deoarece curenții care se închid prin inel la pornire sînt foarte mari și, dacă contactul se face numai prin cîteva puncte, se pot produce încălziri exagerate în acele puncte, însoțite de topirea materialului.

Scanned with OKEN Scanner

4.2.3. Calculul simplificat al caracteristicilor de pornire

Pentru a se face o evaluare a mărimii cuplului și curentului de pornire, se poate efectua un calcul aproximativ.

Dacă nu se ține seama de înfășurarea de excitație și se neglijează efectul legăturii monoaxiale, cuplul este dat de relația aproximativă

$$M=\frac{1}{2}U_1^2\frac{\frac{R_{Dq}}{s}}{\left(R+c_{1q}\frac{R_{Dq}}{s}\right)^2+(X_\sigma+c_{1q}X_{\sigma Dq})^2}+$$

$$+\frac{1}{2}U_1^2\frac{\frac{R_{Dd}}{s}}{\left(R_1+c_{1d}\frac{R_{Dd}}{s}\right)^2+(X_\sigma+c_{1d}X_{\sigma Dd})^2} \tag{4.33}$$

iar curentul este dat de relația

$$\underline{I}=\underline{I}_d+\underline{I}_q; \tag{4.34}$$

cu

$$\underline{I}_q=\frac{1}{2}\underline{U}_1\left[\frac{1}{\mathrm{j}c_{1q}X_{aq}}+\frac{1}{\mathrm{j}\,c_{1q}X_\sigma+c_{1q}^2\frac{R_{Dq}}{s}+\mathrm{j}\,c_{1q}^2X_{\sigma\,Dq}}\right]; \tag{4.35}$$

$$\underline{I}_d=\frac{1}{2}\underline{U}_1\left[\frac{1}{\mathrm{j}c_{1d}X_{ad}}+\frac{1}{\mathrm{j}\,c_{1q}X_\sigma+c_{1d}^2\frac{R_{Dd}}{s}+\mathrm{j}\,c_{1d}^2X_{\sigma\,Dd}}\right] \tag{4.36}$$

$$c_{1q}=1+\frac{X_\sigma}{X_{aq}};\qquad c_{1d}=1+\frac{X_\sigma}{X_{ad}}. \tag{4.37}$$

Mărimile care intră în aceste expresii, adică R_{Dq}, $X_\sigma+c_{1q}X_{\sigma Dq}$, $X_\sigma+c_{1d}X_{\sigma Dd}$ pot rezulta din încercările statice cu înfășurareade excitație deschisă, efectuate pentru rotorul în poziție longitudinală și rotorul în poziție transversală.

Pentru a efectua încercarea statică cu rotorul în poziție longitudinală se alimentează statorul între două faze și se învîrtește rotorul pînă ce tensiunea indusă la bornele înfășurării de excitație este maximă.

Se măsoară la bornele alimentate ale statorului mărimile P, U, I și se calculează

$$R_d''=\frac{P}{2I^2};\qquad Z_d''=\frac{U}{2I};\qquad X_d''=\sqrt{Z_d''^2-R_d''^2} \tag{4.38}$$

Dar

$$R_d''=R_1+c_{1d}R_{Dd}; \tag{4.39}$$

$$X_d''=X_\sigma+c_{1d}X_{\sigma\,Dd}. \tag{4.40}$$

Scanned with OKEN Scanner

Pentru a efectua încercarea statică cu rotorul în poziție transversală se procedează ca mai înainte și se învîrtește încet rotorul pînă ce tensiunea indusă la bornele înfășurării de excitație este nulă. Apoi se efectuează aceleași calcule și măsurători ca mai înainte pentru axa longitudinală.

Într-o primă aproximație, se poate adopta $c_{1d}=1{,}1$; $c_{1q}=1{,}15$.

O dată cunoscuți parametrii axelor longitudinală și transversală, se poate calcula, cu formulele date, cuplul și curentul.

4.3. ÎNCĂLZIREA MAȘINII SINCRONE LA PORNIRE

4.3.1. Încălzirea mașinii sincrone cu rotor tip colivie la pornire

Calculul încălzirii coliviei la pornire se poate efectua întocmai ca pentru motorul asincron.

4.3.2. Încălzirea rotorului masiv la pornire

În timpul pornirii polii se pot încălzi foarte mult din cauza curenților induși în oțel. Încălzirea este cu atît mai mare, cu cît durata pornirii este mai mare. Încălzirile exagerate sînt periculoase atît pentru înfășurarea de excitație dispusă pe poli, cît și pentru celelalte piese ale rotorului.

Calculul încălzirii se poate efectua după metoda dată în lucrările [7] sau [10]. Pentru a aplica metoda este necesar să se cunoască adîncimea de pătrundere a cîmpului electromagnetic în rotor. Adîncimea de pătrundere variază de la un punct la altul al suprafeței rotorului. După cum s-a arătat, se obține un rezultat foarte sigur, dacă se utilizează în calcule o valoare medie a adîncimii de pătrundere, calculată cu relația:

$$\Delta=\frac{1}{\alpha}\approx 0{,}263\cdot\sqrt[3]{w}\ \text{[cm]}, \tag{4.41}$$

unde w reprezintă valoarea medie a pierderilor în oțelul rotoric pe unitatea de suprafață, exprimată în W/cm², pentru $s=1$. Pierderile totale în rotor la $s=1$ pot fi obținute fie prin calcul, fie dintr-o încercare experimentală cu rotorul calat și aplicînd o tensiune redusă, apoi se recalculează pierderile la tensiunea reală de pornire, admițînd orientativ că pierderile variază proporțional cu pătratul tensiunii. Suprafața rotorului poate fi de asemenea evaluată ușor orientativ. Rezultă valoarea pierderilor în oțelul rotoric pe unitatea de suprafață.

Se calculează apoi mărimea

$$\tau_p=am^2t_p, \tag{4.42}$$

Scanned with OKEN Scanner

unde t_p este durata pornirii în secunde, presupunînd că în timpul pornirii turaţia creşte liniar, $m=2$ α (mărimea α a fost determinată mai înainte), iar $a=k/c\delta$ este o constantă care depinde de caracteristicile materialului din care sînt executaţi polii rotorici pentru calităţile de oţel utilizate în general;

$a=0{,}125$;

k — conductivitatea termică a metalului, în W/cm °C;

c — căldura specifică a metalului;

δ — densitatea metalului.

În cazul în care variaţia turaţiei în timpul pornirii nu se abate prea

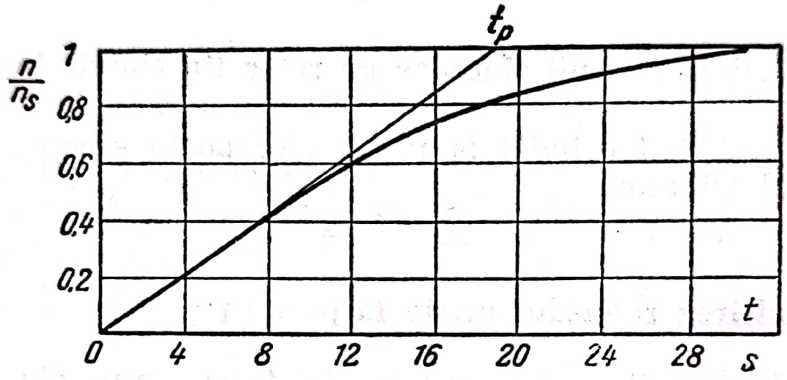


Fig. 4.19. Aproximarea curbei de pornire $n_r=f_r(t)$ prin dreapta tangentă în origine.

mult de la o dreaptă, se poate face aproximaţia de a considera turaţia ca variind liniar în raport cu timpul, după dreapta tangentă în origine la curba turaţiei în funcţie de timp (fig. 4.19).

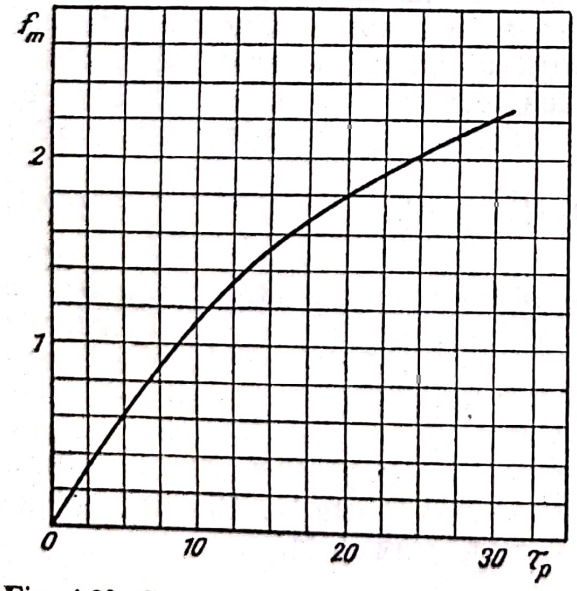


Fig. 4.20. Curba $f_m(\tau_p)$ necesară pentru calculul încălzirii maxime.

După ce se cunoaşte mărimea τ_p, din curba dată în fig. 4.20 se obţine valoarea coeficientului f_m.

Încălzirea maximă a suprafeţei rotorului în timpul pornirii este dată de relaţia:

$$\theta=\frac{W}{mk}f_m. \qquad (4.43)$$

Încălzirea rotorului atinge valoarea maximă aproximativă la timpul de 0,6—0,8 din durata pornirii, deoarece dincolo de această perioadă căldura propagată în rotor depăşeşte căldura dezvoltată care scade, deoarece scade alunecarea.

Scanned with OKEN Scanner

4.4. SISTEMUL DE EXCITAȚIE STATICĂ A MAȘINILOR SINCRONE

4.4.1. Sistemele generale de excitație ale mașinilor sincrone

Sistemele clasice de excitație ale mașinilor sincrone sînt realizate cu generatoare de curent continuu. Sistemele clasice de excitatie se caracterizează prin acea că dispozitivul de reglare este cuprins în circuitul de excitație al mașinii excitatoare. În acest scop circuitul de excitație cuprinde o rezistență variabilă. Forma cea mai simplă a unui sistem clasic de excitație este reprezentată în fig. 4.21 și constă dintr-o mașină excitatoare, care este generator de curent continuu autoexcitat și un regulator electromecanic *R*. Se vede că regulatorul electromecanic este inclus în circuitul de excitație al excitatoarei. Acest sistem de excitație și reglare prezintă inconvenientul că este prea lent. De aceea în cazuri de exigență mai mare, se utilizează un generator de curent continuu suplimentar, denumit mașină excitatoare auxiliară, care servește ca sursă de alimentare pentru circuitul de excitație al celui de al doilea generator de curent continuu, denumit mașină excitatoare principală.. Astfel, se obține schema sistemului de excitație din fig. 4.22., care cuprinde două generatoare de curent continuu: o mașină

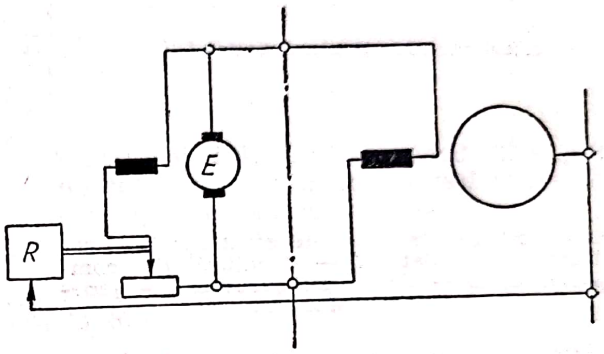


Fig. 4.21. Forma cea mai simplă a unui sistem clasic de excitație a mașinii sincrone:
E — mașina excitatoare; *R* — regulator electromecanic.

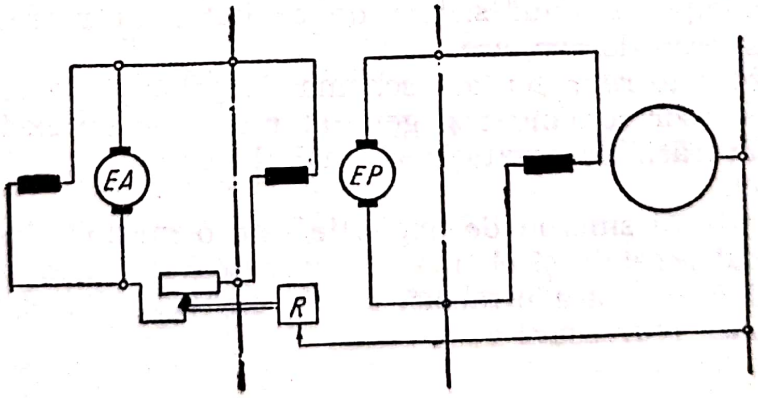


Fig. 4.22. Sistem clasic de excitație cu mașină excitatoare principală *EP* și mașină excitatoare auxiliară *EA*.

excitatoare principală și o mașină excitatoare auxiliară. Cele două mașini excitatoare sînt în general cuplate mecanic direct.

Mașina excitatoare auxiliară reprezintă o sursă de tensiune aproximativ constantă, iar regulatorul electromecanic este inclus în circuitul

indusului acestei mașini, deci permite variația curentului de excitație al mașinii excitatoare principale, care alimentează înfășurarea de excitație a mașinii sincrone.

Pentru a evita utilizarea mașinii excitatoare, care este în general de curent continuu și deci ridică numeroase probleme de întreținere

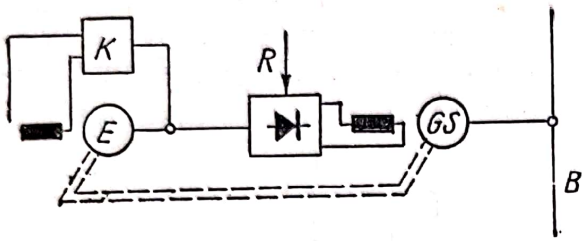


Fig. 4.23. Schema sistemului de excitație cu redresor comandat, alimentat de un generator sincron:
E — generator sincron de excitare; *R* — redresor comandat; *K* — legătură de compundare; *B* — sistem de bare; *GS* — generator sincron.

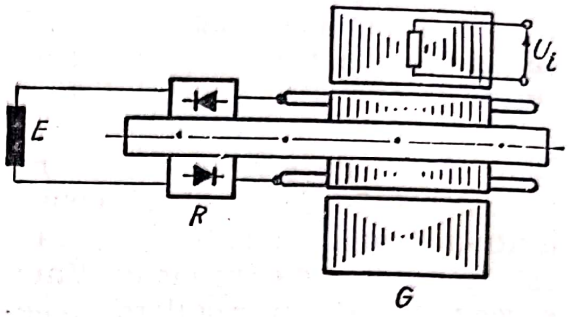


Fig. 4.24. Schema sistemului de excitație fără inele de contact:
E — înfășurarea de excitație a generatorului sincron; *R* — redresor solidar cu arborele; *G* — generator sincron auxiliar pentru alimentarea excitației.

legate în special de comutație și de uzarea periilor, se întrebuințează redresoare comandate, care alimentează înfășurarea de excitație a mașinii sincrone cu curent continuu. Aceste redresoare sînt alimentate fie de la rețeaua de curent alternativ, fie de la un generator sincron polifazat de excitație, de putere mică. În primul caz se lucrează la frecvența normală, iar în al doilea caz la frecvența medie, de exemplu 500 Hz. Excitarea generatoarelor sincrone de excitație se efectuează la o valoare constantă a tensiunii. Reglarea excitației mașinii sincrone se realizează prin grila de comandă a redresorului. În fig. 4.23 este reprezentată schema de principiu a unui sistem de excitație cu redresor comandat cu generator sincron de excitare.

În fig. 4.24 este reprezentată schema de principiu a altui sistem de excitație cu redresor comandat și generator sincron de excitație, iar alimentarea înfășurării de excitație a mașinii sincrone este făcută fără inele de contact.

Aici generatorul sincron de excitație este o mașină sincronă cu poli aparenți, indusul acesteia și elementele redresoare sînt montate pe arborele mașinii sincrone care urmează să fie excitată. Ca elemente redresoare se utilizează redresoare cu siliciu.

4.4.2. Generatoare sincrone autoexcitate cu un sistem de redresoare statice

Prin utilizarea redresoarelor [42—50] se poate face ca indusul mașinii sincrone să fie folosit ca sursă de tensiune pentru înfășurarea de excitație, realizîndu-se astfel un generator sincron autoexcitat. În

Scanned with OKEN Scanner

fig. 4.25 este reprezentată schema de principiu a unui generator sincron autoexcitat. În cazul schemei din fig. 4.25, *a* curentul din înfășurarea de excitație este limitat numai de rezistența înfășurării de excitație și deci este proporțional cu tensiunea la bornele generatorului sincron. Fenomenul de autoexcitare este analog fenomenului de autoexcitare de

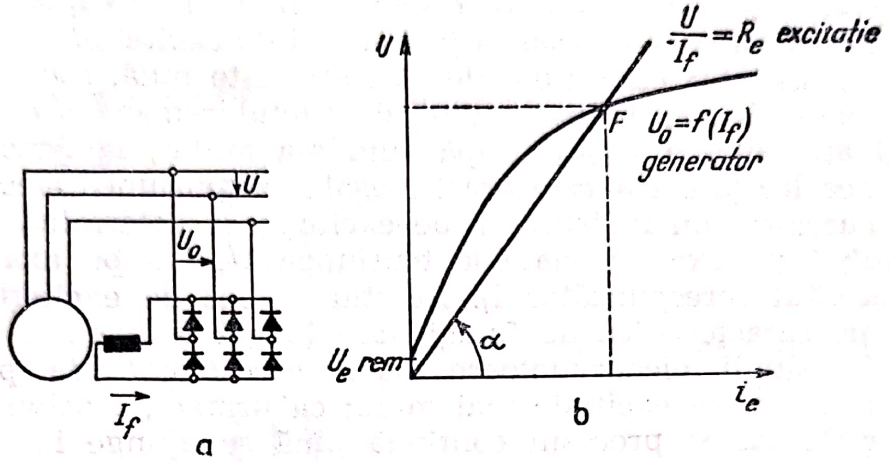


Fig. 4.25. Schema de principiu a unui generator sincron autoexcitat (*a*) și punctul de lucru la funcționarea în gol (*b*).

la mașina de curent continuu cu excitație derivație. Inițial curentul din înfășurarea de excitație a generatorului sincron din fig. 4.25 *a* este nul.

În fig. 4.25, *b* este reprezentat punctul de funcționare în gol al mașinii autoexcitate. Datorită magnetismului remanent al polilor inductori, în înfășurarea indusului apare tensiunea electromotoare $U_{e\,rem}$. Aceasta va produce un curent care se închide prin indus și înfășurarea de excitație. Dacă legăturile dintre indus și înfășurarea de excitație sînt realizate convenabil, atunci curentul produs de tensiunea electromotoare $U_{e\,rem}$ produce un flux magnetic care întărește fluxul magnetic inductor. Ca urmare, crește tensiunea electromotoare care apare în înfășurarea indusului U_{e0} și de asemenea curentul din înfășurarea de excitație și procesul descris continuă, pînă cînd se ajunge la un punct de echilibru stabil între curentul din înfășurarea de excitație, fluxul magnetic inductor și tensiunea electromotoare indusă.

Curentul de excitație al mașinii sincrone autoexcitate se închide prin înfășurarea de excitație și prin diferitele faze ale indusului, conform perioadelor de conducție a elementelor redresorului.

Curentul de excitație la funcționarea în gol este mic și deoarece impedanța indusului mașinii sincrone este neglijabilă față de rezistența înfășurării de excitație a aceleiași mașini, urmează că valoarea căderii de tensiune pe rezistența indusului produsă de curentul de excitație este neglijabilă față de tensiunea electromotoare indusă. Deci tensiunea la borne, la funcționarea în gol a generatorului sincron autoexcitat, poate fi considerată practic egală cu tensiunea electromotoare indusă.

În fig. 4.25, *b* sînt reprezentate: caracteristica de funcționare în gol $U_0=f(I_f)$, unde U_0 este tensiunea electromotoare, iar I_f intensitatea cu-

Scanned with OKEN Scanner

rentului de excitație și curba $U=f(I_f)$, unde U este tensiunea la bornele înfășurării de excitație, iar I_f intensitatea curentului de excitație. Deoarece pentru o valoare oarecare a tensiunii la borne, intensitatea curentului de excitație este determinată numai de rezistența înfășurării de excitație R_f care este constantă, rezultă că ecuația $U=f(I_f)$, adică $\frac{U}{I_f}=R_f=\operatorname{tg}\alpha=\text{const}$, reprezintă o dreaptă, numită dreapta sau curba caracteristică tensiune — curent a înfășurării de excitație.

Cînd intensitatea curentului de excitație este nulă, atunci tensiunea electromotoare U_0 este indusă numai de fluxul remanent al polilor inductori și are valoare $U_{e\,rem}$. După cum s-a arătat, la funcționarea în gol tensiunea lor la borne este practic egală cu tensiunea electromotoare. De aceea curentul din înfășurarea de excitație se determină pe dreapta $U=f(I_f)$ luînd pe axa ordonatelor tensiunea U, iar pe axa absciselor rezultă curentul corespunzător I_f. Acestui curent de excitație îi corespunde de pe caracteristica de funcționare în gol o tensiune electromotoare U_0. Tensiunii electromotoare U_0 îi corespunde de pe dreapta $U=f(I_f)$ un curent de excitație mai mare; ca urmare, tensiunea electromotoare crește iar și procesul continuă pînă se ajunge în punctul de intersecție al caracteristicii de funcționare în gol cu dreapta caracteristică a înfășurării de excitație. Punctul de funcționare astfel obținut este stabil, deoarece, după cum se poate arăta, dacă dintr-o cauză oarecare se modifică tensiunea electromotoare sau curentul de excitație, iar apoi acea cauză dispare, mașina revine în punctul anterior de funcționare.

Din examinarea fig. 4.25, *b* rezultă de asemenea că punctul de funcționare în gol depinde de rezistența circuitului de excitație. Dacă rezistența circuitului de excitație are o valoare denumită rezistența critică, pentru care drepta caracteristică a înfășurării de excitație coincide cu porțiunea rectilinie a caracteristicii de funcționare în gol, punctul de funcționare al generatorului sincron autoexcitat nu este determinat și funcționarea este instabilă. Valoarea rezistenței de excitație din acest caz se numește valoarea critică. Deci pentru ca autoexcitarea să fie posibilă este necesar ca dreapta $U=f(I_f)$ și curba $U_0=f(I_f)$ să se intersecteze, iar pentru aceasta este necesar ca rezistența circuitului de excitație să fie mai mică decît rezistența critică.

La funcționarea în sarcină fenomenele sînt mai complicate. Reacția indusului mașinii sincrone autoexcitate face ca tensiunea la bornele generatorului să varieze simțitor cu sarcina, chiar la un curent de excitație constant, deci cu atît mai mult cînd variază și acest curent odată cu tensiunea la borne, cum se întîmplă la schema din fig. 4.25, *a*.

În domeniul sarcinilor active și inductive se obțin din acest motiv caracteristici tensiune-curent foarte căzătoare. Un astfel de generator nu este practic utilizabil.

Pentru a evita inconvenientul descris se utilizează schemele cu generatorul sincron autoexcitat compundat. În fig. 4.26 este dată o schemă de acest fel. În schemele cu generator sincron autoexcitat compundat, curentul de excitație conține o componentă care depinde de curentul din indusul generatorului și compensează efectul reacției indusu-

Scanned with OKEN Scanner

lui. Astfel, curentul de excitație este rezultanta a două componente. Prima este componenta fundamentală I_{f0} și are valoarea determinată de tensiunea la bornele generatorului sincron, care este aproximativ egală cu tensiunea electromotoare indusă de fluxul rezultant din întrefier (neglijînd căderea de tensiune pe rezistența și reactanța de scăpări). A doua componentă este componenta suplimentară I_{fa} și are valoarea determinată de curentul indusului. Se va utiliza acum diagrama de fazori a mașinii sincrone dată în fig. 4.27.

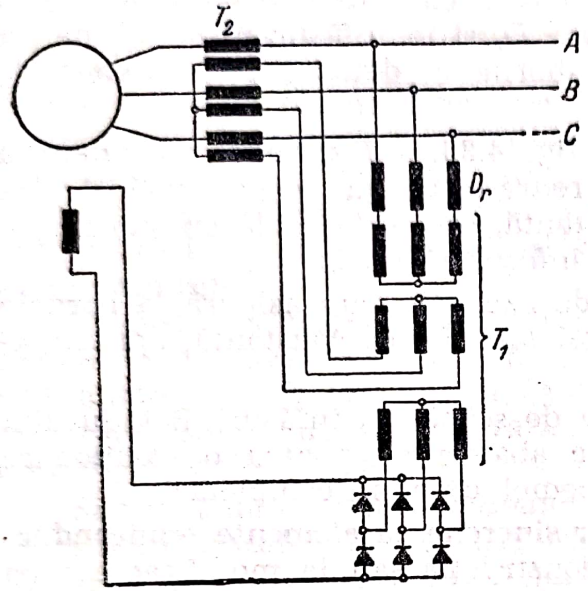


Fig. 4.26. Schema cu generator sincron autoexcitat compundat:

T_1 — transformator pentru compundarea solenațiilor de excitație; T_2 — transformator pentru obținerea unei solenații de excitație proporționale cu intensitatea curentului de sarcină; D_r — bobină de reactanță pentru obținerea unei solenații proporționale cu tensiunea la bornele generatorului și defazate cu un sfert de perioadă în urmă față de tensiune.

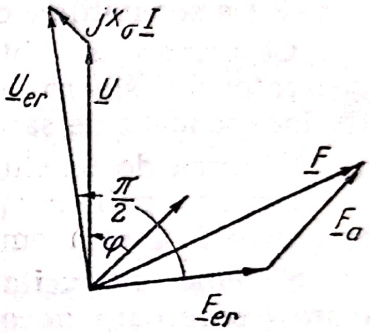


Fig. 4.27. Diagrama de fazori a generatorului sincron:

$\underline{U}$ — tensiunea de fază la bornele indusului; $\underline{I}$ — curentul din indus; X_σ — reactanța de scăpări pe fază a indusului; $\underline{U}_{er}$ — tensiunea electromotoare indusă de fluxul inductor din întrefier; $\underline{F}_{er}$ — solenația de excitație care produce tensiunea electromotoare $\underline{U}_{er}$; $\underline{F}_a$ — solenația de excitație care compensează reacția indusului; $\underline{F}$ — solenația de excitație rezultantă.

Tensiunea electromotoare indusă de fluxul rezultant din întrefier este defazată cu un sfert de perioadă în urmă față de solenația de excitație. Solenația de excitație necesară pentru compensarea fluxului magnetic de reacție a indusului este în fază cu fluxul magnetic de reacție a indusului.

De aceste defazaje este necesar să se țină seama la compunerea curenților de excitație pe partea de curent alternativ a redresorului și aceasta se realizează cu ajutorul transformatorului T_1 (fig. 4.26) a cărui înfășurare secundară alimentează redresorul.

Scanned with OKEN Scanner

Primarul transformatorului T_1, are două înfăşurări: o înfăşurare este parcursă de un curent care are defazajul şi valoarea eficace a curentului indusului. Acest curent este obţinut cu ajutorul transformatorului de curent T_2; a doua înfăşurare a primarului transformatorului T_1 trebuie să fie parcursă de un curent proporţional cu tensiunea la borne şi defazat cu un sfert de perioadă în urmă faţă de aceasta. De aceea această înfăşurare a transformatorului este conectată la tensiunea bornelor printr-o reactanţă inductivă mare D_r şi în înfăşurare se obţine un curent proporţional cu tensiunea la borne şi defazat cu un sfert de perioadă în urmă.

Corespunzător conexiunilor din fig. 4.26, înfăşurarea secundară a transformatorului care alimentează redresorul, va fi parcursă de un curent proporţional cu solenaţia rezultantă, care este egală cu suma geometrică a solenaţiilor componente din înfăşurările primare.

Ca urmare, se obţine un curent de excitaţie care asigură la bornele generatorului sincron o tensiune de valoare eficace constantă, aproximativ independent de sarcină.

Căderea de tensiune pe reactanţa de scăpări a înfăşurării indusului şi existenţa polilor aparenţi introduc abateri şi, pentru o soluţionare mai exactă a problemei, se aduc schemei descrise completări.

Sistemul de excitaţie a motoarelor sincrone cu elemente semiconductoare (redresoare necomandate). La construcţia sau la modificarea unei instalaţii care cuprinde motoare sincrone este necesar să se adopte un anumit sistem de excitaţie. Sistemul de excitaţie al unei maşini sincrone este adoptat în funcţie de mai mulţi factori care pot fi rezumaţi prin: economicitate; stabilitate; fiabilitate.

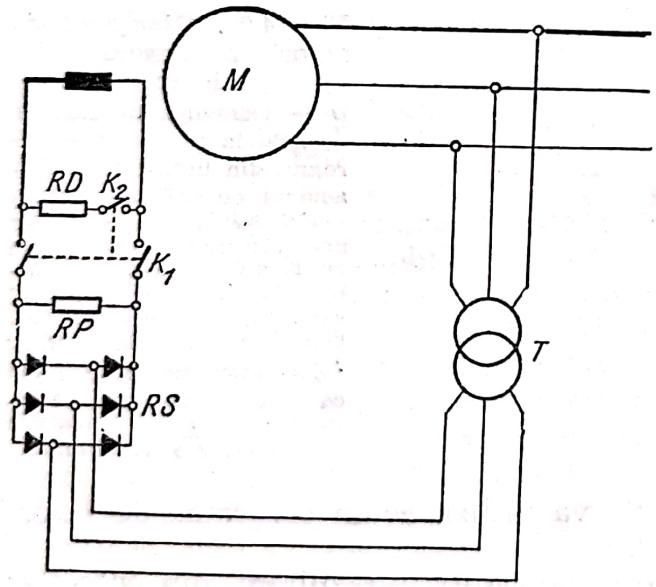


Fig. 4.28. Schemă de excitaţie derivaţie cu diode redresoare.

Prin economicitate se urmăreşte un preţ de cost cît mai redus. Condiţia de stabilitate presupune ca motorul să poată prelua creşteri importante ale cuplului şi să suporte căderi mari de tensiune pe reţea, fără pericolul de a ieşi din sincronism. Prin fiabilitate se urmăreşte o siguranţă în funcţionare un timp îndelungat.

Sistemul de excitaţie derivaţie cu redresoare semiconductoare; schema de excitaţie cea mai economică este reprezentată în fig. 4.28. Aceasta este o schemă de excitaţie derivaţie cu diode redresoare. Înfăşurarea de excitaţie a motorului sincron este alimentată de un redresor în punte *RS* alimentat de la un transformator cu prize.

Scanned with OKEN Scanner

Schema descrisă este simplă, ceea ce este convenabil dar are unele inconveniente. Astfel, curentul de excitație este proporțional cu tensiunea rețelei și deci tensiunea electromotoare indusă în înfășurarea indusului de fluxul magnetic inductor este de asemenea aproximativ proporțională cu tensiunea rețelei. Dar cuplul motorului sincron este proporțional cu produsul dintre tensiunea la borne, adică tensiunea rețelei, și tensiunea electromotoare indusă de fluxul inductor, deci pentru schema din fig. 4.28 cuplul este proporțional cu pătratul tensiunii rețelei. De aceea, în caz de avarie pe rețea, cînd are loc o micșorare a tensiunii rețelei la bornele motorului, pericolul ca motorul să iasă din sincronism este mare. De asemenea, puterea reactivă cedată de motor rețelei nu este reglată în funcție de puterea activă și de aceea pot apărea variații nedorite ale tensiunii și ale factorului de putere în diferite puncte ale rețelei.

Utilizarea schemei descrise rămîne însă recomandabilă pentru motoarele care funcționează cu un cuplu rezistent aproximativ constant și sînt alimentate de la o rețea care are o putere mare de scurtcircuit, deci care asigură în caz de avarie, variații cît mai mici ale tensiunii la bornele consumatorului.

Sistemul de excitație compund cu elemente semiconductoare (redresoare necomandate); în fig. 4.29 este reprezentată o schemă de excitație compund cu diode redresoare. Această schemă este analogă schemei de excitație a generatorului sincron compundat din fig. 4.26 prin care se urmărea să se mențină constantă tensiunea la bornele generatorului. S-a

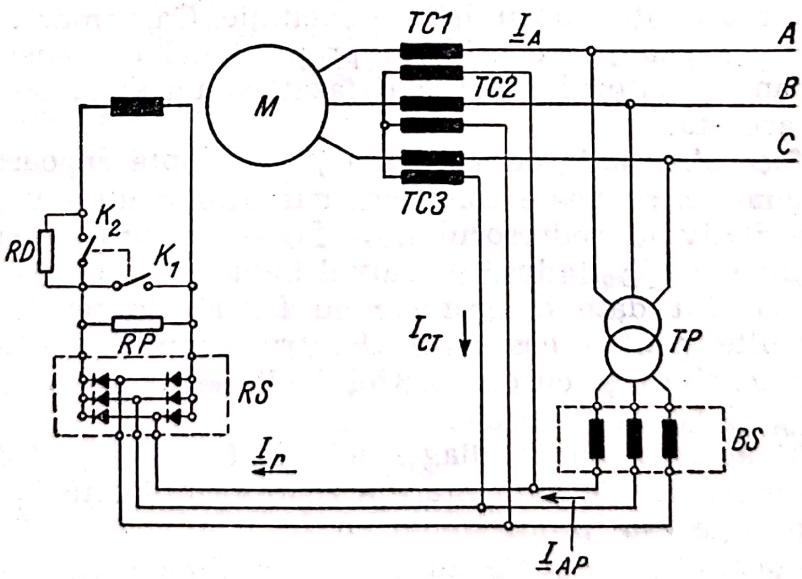


Fig. 4.29. Schemă de excitație compund cu diode redresoare.

efectuat însă o modificare și anume, legăturile dintre capetele de ieșire ale bobinei de reactanță și capetele înfășurărilor secundare ale transformatoarelor de curent sînt astfel efectuate încît transformatorul de intensitate alimentat de faza *A* în cazul generatorului sincron este aici înlocuit prin transformatorul alimentat de faza precedentă, adică faza *C*.

Scanned with OKEN Scanner

Schema din fig. 4.29 conține transformatorul *TP*, o bobină de reactanță trifazată *BS* care este alimentată prin transformatorul *TP* de la tensiunea rețelei și transformatoarele de intensitate *TC* a căror înfășurare primară este parcursă de curentul din indusul motorului. Intensitatea curentului din bobina de reactanță *BS* este $\underline{I}_0$, iar intensitatea curentului din secundarul transformatoarelor de curent este $\underline{I}_a$. Prin compunerea curenților $\underline{I}_0$ și $\underline{I}_a$ se obține curentul rezultant $\underline{I}_r$ care alimentează redresorul. Prin redresarea acestui curent se obține curentul de excitație al motorului.

Schema de excitație din fig. 4.29 permite să se mențină la bornele motorului factorul de putere constant, independent de sarcină.

Menținerea constantă a factorului de putere independent de sarcină. Ecuația tensiunilor mașinii sincrone (sub forma simplă, cînd se neglijează rezistența statorului și variația reactanței în cele două axe) este în acest caz

$$\underline{U} = -\underline{U}_{e0} + \mathrm{j}X_s\underline{I}, \tag{4.44}$$

unde $\underline{U}$ este tensiunea de fază la borne, $\underline{U}_{e0}$ tensiunea indusă de cîmpul magnetic inductor, X_s — reactanța sincronă, $\underline{I}$ — curentul de fază.

Tensiunile și curenții din secundarul transformatoarelor *TP* și *TC* vor fi indicați cu literele *P*, respectiv *T*. Trebuie menționat că, în conformitate cu legăturile din schema dată în fig. 4.29, curenții $\underline{I}_A$ și $\underline{I}_{AT}$ din circuitele primar și secundar ale transformatoarelor de curent sînt în fază.

Ca și în cazul generatorului, reactanța bobinei *BS* este foarte mare comparativ cu rezistența înfășurării de excitație. Ca urmare, curentul pe fază a bobinei $\underline{I}_{AP}$ poate fi considerat proporțional cu tensiunea secundară $\underline{U}_{AP}$ a transformatorului *TP* și defazat cu un sfert de perioadă în urmă față de aceasta.

Dacă se face abstracție de saturație și se adoptă rapoarte de transformare convenabile, se poate considera curentul rezultant din circuitul de curent alternativ al redresorului, $\underline{I}_r = \underline{I}_{AP} + \underline{I}_{CT}$, proporțional cu tensiunea electromotoare $\underline{U}_{e0}$ indusă de fluxul inductor.

În fig. 4.30 sînt date diagramele de fazori ale tensiunilor și curenților construite pentru cos $\varphi = 1$. Pentru simplificare s-au adoptat scările pentru tensiuni și curenți astfel încît segmentele reprezentative ale fazorilor $\underline{U}_A$ și $\underline{I}_{AP}$ să fie egale.

În fig. 4.31 au fost reunite diagramele de fazori *b* și *d* din fig. 4.30.

Curentul alternativ de alimentare a redresorului este $\underline{I}_r$, iar curentul continu de excitație este proporțional cu $\underline{I}_r$.

Neglijînd saturația, se poate admite că tensiunea electromotoare $\underline{U}_{e0}$ și curentul rezultant $\underline{I}_r$ sînt proporționale și, ca urmare, cu scările adoptate pentru tensiuni și curenți, sînt reprezentați prin fazori de aceeași lungime. Extremitățile fazorilor $\underline{U}_{e0}$ și $\underline{I}_r$ se află pe cercul cu centrul în *M* și raza egală cu lungimea fazorului $\underline{U}_{e0}$.

Dacă cuplul de sarcină se micșorează, curentul I_{CT} se micșorează de asemenea, dar curentul I_{AP} care este proporțional cu tensiunea rețelei, a cărei valoare eficace rămîne constantă, nu se modifică. Com-

Scanned with OKEN Scanner

parînd noile valori ale curenților, se obține o nouă valoare mai mică a curentului I_r, deci se micșorează curentul de excitație corespunzător cu noua valoare a sarcinii, iar factorul de putere variază puțin.

Pentru mai multă claritate în fig. 4.31 se dă diagrama de fazori pentru puterea nominală și pentru jumătate din valoarea acestei puteri, tensiunile electromotoare și curenții la funcționarea cu această putere,

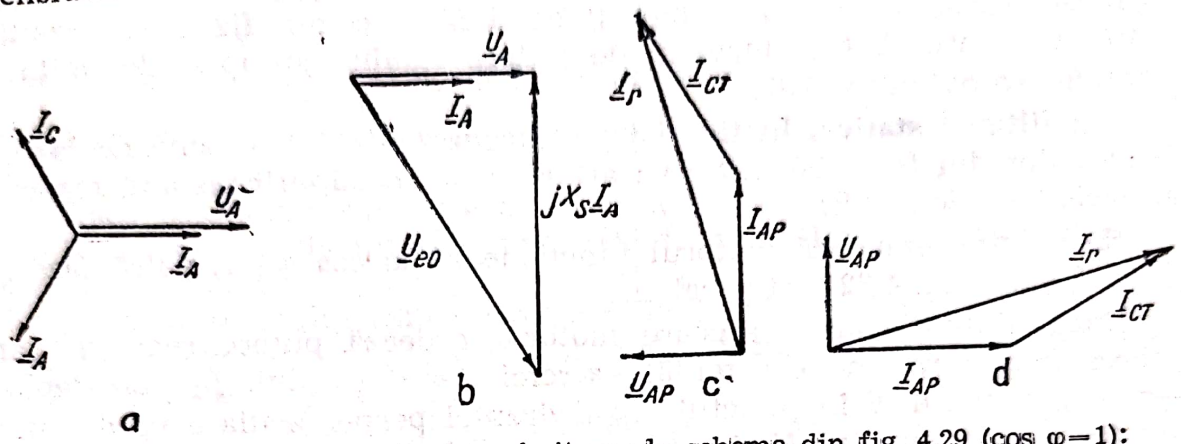


Fig. 4.30. Diagrame de fazori referitoare la schema din fig. 4.29 (cos φ=1): *a* — diagrama de fazori a curenților de fază din indus; *b* — diagrama de fazori a tensiunilor; *c* — diagrama de fazori a curenților din secundarul transformatoarelor TP și TC, compunerea curenților; *d* — diagrama de fazori.

se vor nota cu semnul prim. După cum se poate vedea pe diagramele de fazori din fig. 4.31, pentru a realiza funcționarea la jumătate din puterea nominală, extremitatea fazorului $jX_s\underline{I}$ trebuie să se deplaseze pe dreapta FF' perpendiculară la jumătatea fazorului $jX_s\underline{I}$, deoarece puterea este proporțională cu $I\cos\varphi$ (unghiul φ este cel notat pe figură) și, pentru a realiza o proiecție constantă pe $jX_s\underline{I}$, extremitatea fazorului $jX_s\underline{I}$ trebuie să se deplaseze pe dreapta amintită.

Din același motiv extremitatea fazorului $\underline{I}'_{CT}$ trebuie să se deplaseze pe dreapta perpendiculară la jumătatea fazorului $\overline{OB}$. Punctul de funcționare se realizează atunci cînd unghiul φ dintre fazorii $jX_s\underline{I}$ și $jX_s\underline{I}'$ de pe diagrama de fazori a tensiunilor și unghiul φ dintre fazorii $\underline{I}$ și $\underline{I}'$ de pe diagrama de fazori a curenților au aceeași valoare, lungimea fazorului $\underline{U}'_{e0}$ și lungimea fazorului $\underline{I}'_r$ sînt egale iar unghiul dintre segmentele. $\underline{I}'$ și $\underline{I}'_{CT}$ este de 120°. Rezultă construcția din fig. 4.31.

După cum se vede, pentru noua sarcină care este jumătate din cea nominală, se obține un factor de putere apropiat de valoarea anterioară $\cos\varphi=1$. Excitația

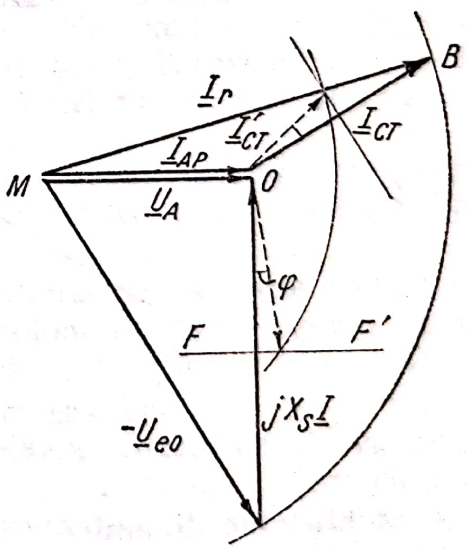


Fig. 4.31. Diagrama de fazori a tensiunilor și curenților motorului sincron din fig. 4.29 pentru curentul nominal și $\cos\varphi=1$ și pentru jumătate din curentul nominal.

Scanned with OKEN Scanner

fiind puțin mai mare decît valoarea necesară pentru a realiza cos $\varphi = 1$, apare o ușoară supracompensare, care fiind mică nu produce inconveniente în ceea ce privește stabilitatea sau încălzirea înfășurării de excitație.

Într-un calcul mai exact este necesar să se țină seama că, datorită saturației, fazorii $\underline{I}_r$ și $\underline{U}_{e0}$ nu sînt proporționali și anume, la aceeași valoare a lui $\underline{I}_r$ ca în fig. 4.31, lungimea fazorului $\underline{U}_{e0}$ rezultă ceva mai mică. De aceea în realitate unghiul de defazaj φ din fig. 4.31 rezultă puțin mai mare. Totuși factorul de putere rămîne apropiat de unitate și anume aproximativ 0,97.

Stabilitatea statică. În fig. 4.32 este reprezentată diagrama de fazori a curenților din fig. 4.30, *d*. Se va arăta că la un cuplu constant, mașina acționează static stabil.

Se va presupune că motorul funcționează la cos $\varphi = 1$, adică fazorii $\underline{U}_{CP}$ și $\underline{I}_{CT}$ din fig. 4.32 sînt paraleli.

Dacă dintr-o cauză oarecare motorul cedează putere reactivă, iar puterea activă rămîne constantă, extremitatea fazorului $\underline{I}_{CT}$ se deplasează din punctul N în punctul N' al dreptei perpendiculare pe dreapta care trece prin punctul N și este perpendiculară pe fazorul $\overline{MN}$. Pentru noul punct de funcționare N' curentul de excitație devine $\overline{ON'}$, deci scade, ceea ce determină revenirea la punctul anterior de funcționare N, adică la condițiile de funcționare inițiale.

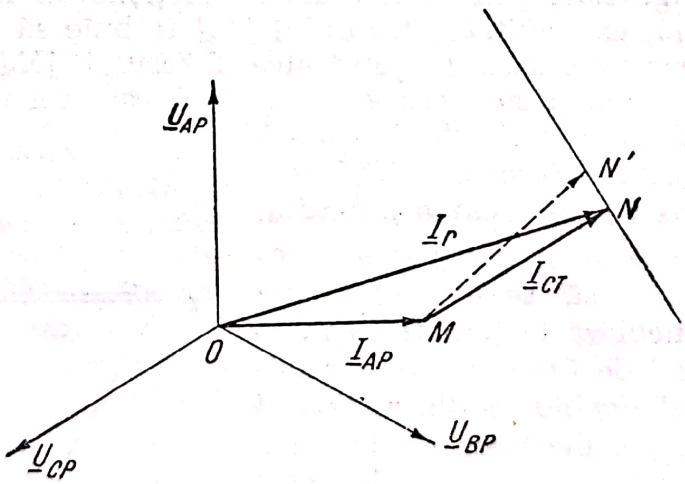


Fig. 4.32. Diagrama de fazori a curenților și explicarea stabilității statice.

Stabilitatea dinamică. Cînd se produce o scădere bruscă de tensiune, în cursul fenomenului tranzitoriu curentul statoric crește brusc, fiind determinat de reactanțele tranzitorii și supratranzitorii care sînt mult mai mici decît reactanța în regim stabilizat, iar după aceea scade pînă la valoarea corespunzătoare regimului stabilizat pentru noua valoare mai mică a tensiunii.

Scanned with OKEN Scanner

Curentul din înfășurarea inductorului are o variație asemănătoare.

Transformatoarele de intensitate *TC* din fig. 4.29 contribuie la menținerea curentului de excitație la valoarea inițială, iar curentul de excitație descrește mai încet decît curentul statoric. Noul punct de funcționare a mașinii, determinat de sistemul de excitație, are un defazaj al curentului în urma tensiunii și un unghi intern al mașinii, pentru o valoare dată a cuplului rezistent, cu atît mai mare cu cît căderea de tensiune este mai importantă. În adevăr, puterea electromagnetică a mașinii este $P_M = m \frac{U U_{e0}}{X_s} \sin \theta$ și deoarece U și U_{e0} scad odată cu scăderea tensiunii, pentru a menține cuplul și deci P_M constant, trebuie să crească unghiul intern θ.

Dacă scăderea tensiunii este pronunțată, atunci mașina iese din sincronism, dacă avaria nu este eliminată într-un timp mai mic de cîteva zecimi de secundă.

Datorită efectului transformatoarelor de curent din fig. 4.29, această schemă de excitație prezintă o stabilitate statică și dinamică mai mare decît schema din fig. 4.28.

Pentru a îmbunătăți performanțele schemei de excitație din fig. 4.29, se recomandă uneori utilizarea de transformatoare de curent speciale. Aceste transformatoare, denumite transformatoare de curent hipercompund, sînt prevăzute cu o înfășurare suplimentară, denumită înfășurare de saturare, care este alimentată de la o sursă de tensiune continuă de o valoare care se reglează automat.

La funcționarea în regim normal, solenația înfășurării de saturare, datorită efectului de saturație, combate tendința de supraexcitare a mașinii, care a fost explicată referitor la fig. 4.31.

La funcționarea în regim tranzitoriu, solenația înfășurării de saturație întărește efectul de menținere a curentului de excitație la valoarea inițială, deci mărește stabilitatea dinamică a mașinii. Totuși nu se poate asigura stabilitatea dinamică în cazul unei scăderi pronunțate și relativ îndelungate.

Deoarece utilizarea transformatoarelor de curent speciale complică schema și îi ridică prețul de cost, fără a-i mări prea mult eficiența, ea nu este în general recomandabilă.

Performanțele motoarelor sincrone cu sisteme de excitație compund cu elemente semiconductoare (redresoare necomandate). În figurile 4.33, *a* și *b* sînt reprezentate sistemul cu însumarea curenților și sistemul cu însumarea tensiunilor.

Sistemul de excitație compund cu însumarea curenților. Se va examina mai întîi schema din fig. 4.33, *a* care reprezintă un sistem cu însumarea curenților. Curentul alternativ de alimentare a redresoarelor este suma a două componente: curentul $\underline{I}_P$ care este dat de transformatorul conectat în paralel cu rețeaua și curentul $\underline{I}_T$ dat de transformatorul de curent conectat în serie cu statorul.

Curentul $\underline{I}_P$ este determinat de tensiunea $\underline{U}_1'$ a rețelei raportată la secundarul transformatorului, de impedanța de scurtcircuit a transforma-

Scanned with OKEN Scanner

torului raportată la secundarul transformatorului, inclusiv reactanța bobinei din circuitul secundar în total $Z'_k \approx jX'_k$, și de rezistența înfășurării de excitație R_f,

$$\underline{I}_p = \frac{\underline{U}_2}{R_f + jX'_k} = \frac{-\underline{U}'_1}{R_f + jX'_k} = \frac{-k_U \underline{U}_1}{R_f + jX'_k}, \tag{4.45}$$

unde k_U este raportul de transformare sub forma

$$k_U = \frac{U_2}{U_1}. \tag{4.46}$$

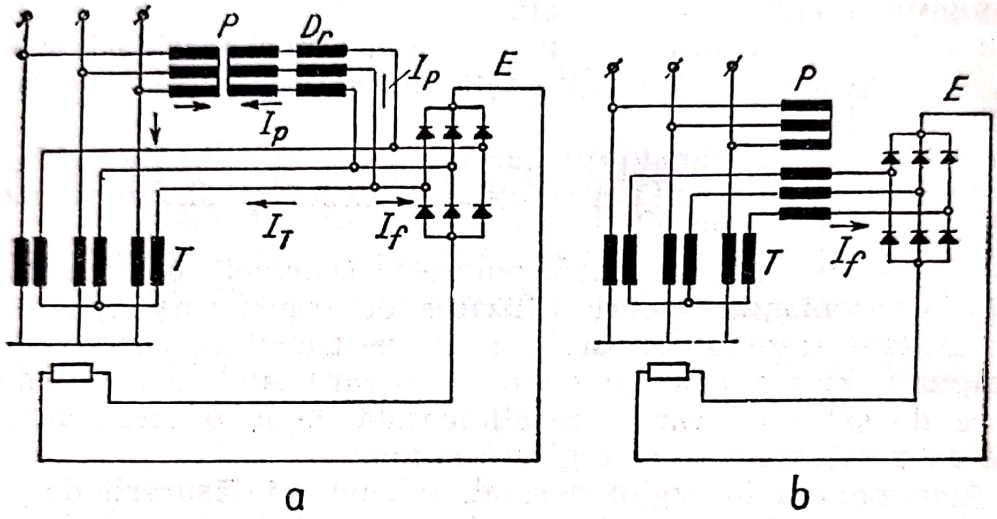


Fig. 4.33. Sistemele de excitație compund cu redresoare semiconductoare pentru motoare sincrone:
a — sistemul cu însumarea curenților; *b* — sistemul cu însumarea tensiunilor.

Curentul $\underline{I}_T$ din secundarul transformatorului de curent se ramifică într-o componentă care alimentează redresorul în curent alternativ și într-o componentă care se închide prin transformatorul *P*. Prin urmare, impedanța prin care trece curentul $\underline{I}_T$ este

$$\frac{R_f \; jX'_k}{R_f + jX'_k} \underline{I}_T,$$

iar tensiunea la bornele acestei impedanțe

$$\frac{R_f jX'_k}{R_f + jX_k} \underline{I}_T, \tag{4.47}$$

deci partea din curentul $\underline{I}_T$ care se ramifică în circuitul de alimentare în curent alternativ al redresorului este

$$\frac{1}{R_f} \cdot \frac{R_f \; jX'_k}{R_f + jX'_k} \underline{I}_T, \tag{4.48}$$

Scanned with OKEN Scanner

Prin urmare, curentul alternativ total care alimentează redresorul ținînd seama de sensurile din fig. 4.33 este

$$\underline{I}_f = \frac{k_U \underline{U}_1}{R_f + jX'_k} - \frac{Xj'_k}{R_f + jX'_k} I_T \tag{4.49}$$

sau

$$I_f = k_U \underline{U}_1 [Y e^{-j\alpha} + Y X'_k \underline{I}_T \; e^{-j(90° + \alpha)}], \tag{4.50}$$

unde

$$Y = \frac{1}{\sqrt{R^2 + X'^2_k}}; \quad \text{tg } \alpha = \frac{X'_k}{R_f}. \tag{4.51}$$

Rezultatul obținut cu expresia (4.51) este mai exact decît cel obținut prin adunare, fără a ține seama de ramificarea curenților, cum s-a procedat orientativ la punctul precedent.

Pentru a se obține proprietăți de reglare mai bune, se efectuează o permutare a legăturilor între transformatoarele T și P, obținîndu-se schemele din fig. 4.33. De aceea

$$\underline{I}_T = -k_T \underline{I} \, e^{j\,120°}$$

sau, dacă se ia ca bază fazorul $\underline{U}_1$,

$$\underline{I}_T = -k_T I \, e^{j\,(120° - \varphi)}; \tag{4.52}$$

unde k_T este raportul de transformare al transformatorului de curent T sub forma

$$k_T = \frac{I_2}{I_1}.$$

Deci,

$$\underline{I}_f = k_U \underline{U}_1 [Y e^{-j\alpha} - k_T Y X'_k \underline{I} e^{j(30° - \varphi - \alpha)}]. \tag{4.53}$$

Utilizînd bobina de reactanță cu o valoare convenabilă a inductanței, se pot obține condiții bune de reglare. Astfel, s-a găsit că o valoare convenabilă pentru a obține un sistem compact este $\alpha = 30°$.

Raportul de transformare al transformatorului de curent T rezultă din relația (4.53).

La funcționarea în gol, dacă motorul nu absoarbe și nu cedează putere reactivă, atunci curentul statoric este nul, $I = 0$, iar curentul de alimentare al redresorului sistemului de excitație se va nota cu I_{f0}. În acest caz se obține

$$k_U = \frac{I_{f0}}{Y U_1}. \tag{4.54}$$

Dacă se cunoaște k_U și se notează cu I_{fN} curentul de alimentare al redresorului sistemului de excitație la regim nominal, atunci se obține din relația (4.53)

$$k_T = \frac{k_U Y \underline{U}_1 \; e^{-j\alpha} - \underline{I}_{fN}}{X'_k \, Y I \; e^{j(30° - \varphi - \alpha)}}; \tag{4.55}$$

În fig. 4.34 sînt date curbele curentului și inducției în diferitele elemente ale schemei din fig. 4.33, *a* în funcție de curentul statoric, pentru un motor sincron de 30 kW. Din curbele din figură se vede că odată cu creșterea curentului statoric, crește și curentul total care alimentează sistemul de excitație, deoarece crește curentul introdus de transformatorul de curent.

În fig. 4.35, *a* sînt reprezentate caracteristicile de funcționare și caracteristica unghiulară a motorului de 30 kW. Din curbele din figură se vede că motorul funcționează cu un factor de putere capacitiv, apropiat de unitate pentru un domeniu larg de variație a sarcinii, și, de asemenea, prezintă o stabilitate statică bună.

Sistemul de excitație compund cu însumarea tensiunilor. Se va examina acum schema din fig. 4.33, *b* care reprezintă un sistem cu însumarea tensiunilor.

Tensiunea rezultantă care alimentează în curent alternativ redresorul sistemului de excitație constă aici din două componente: tensiunea $\underline{U}_T$ proporțională cu intensitatea curentului statoric, care este introdusă de transformatorul T cu înfășurarea primară în serie cu statorul mașinii și tensiunea $\underline{U}_P$ proporțională cu tensiunea rețelei, care este introdusă de transformatorul P conectat în paralel cu rețeaua.

Curentul din secundarul transformatorului P este

$$\underline{I}_P = \frac{U_2}{R_f + jX'_k} = -\frac{k_U \underline{U}_1}{R_f + jX'_k}. \tag{4.56}$$

Curentul din secundarul transformatorului T este

$$\underline{I}_T = -k_T \underline{I} = -k_T I\, e^{-j\varphi}, \tag{4.57}$$

unde s-a luat ca bază fazorul $\underline{U}_1$.

Prin urmare, curentul alternativ total care alimentează redresorul, ținînd cont de sensurile din fig. 4.33 este:

$$\underline{I}_f = -\underline{I}_P - \underline{I}_T$$

sau

$$\underline{I}_f = k_U Y \underline{U}_1\, e^{-j\alpha} + k_T I\, e^{-j\varphi}, \tag{4.58}$$

unde Y este dat de relația (4.51)

Valoarea reactanței transformatorului P și a bobinei de reactanță rezultă din relația (4.50)

$$X'_k = R_f \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \alpha} - 1}, \tag{4.59}$$

unde se introduce valoarea dorită a lui α. S-a găsit că o valoare convenabilă pentru a obține un sistem compact este $\alpha = 30°$.

Raportul de transformare k_U se poate obține din relația (4.58). Rezultă pentru $I = 0$

$$k_U = \frac{I_{f0}}{Y U_1}. \tag{4.60}$$

Scanned with OKEN Scanner

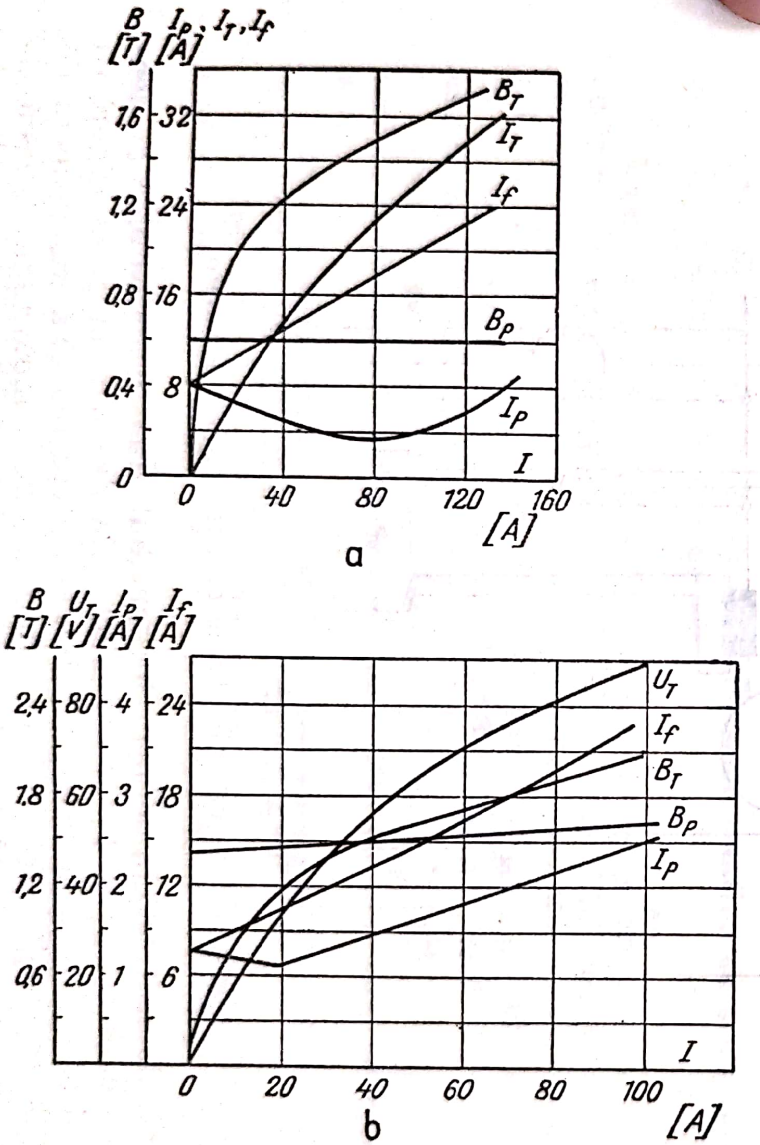


Fig. 4.34. Inducția B_T din miezul transformatorului T, curenții I_T, I_P și I_f și inducția B_P din miezul transformatorului P în funcție de curentul statoric, pentru un motor sincron de 30 kW, pentru:

a — schema din fig. 4.33, *a*; *b* — schema din fig. 4.33, *b*; U_t — tensiunea la bornele transformatorului de curent din fig. 4.33, *b*.

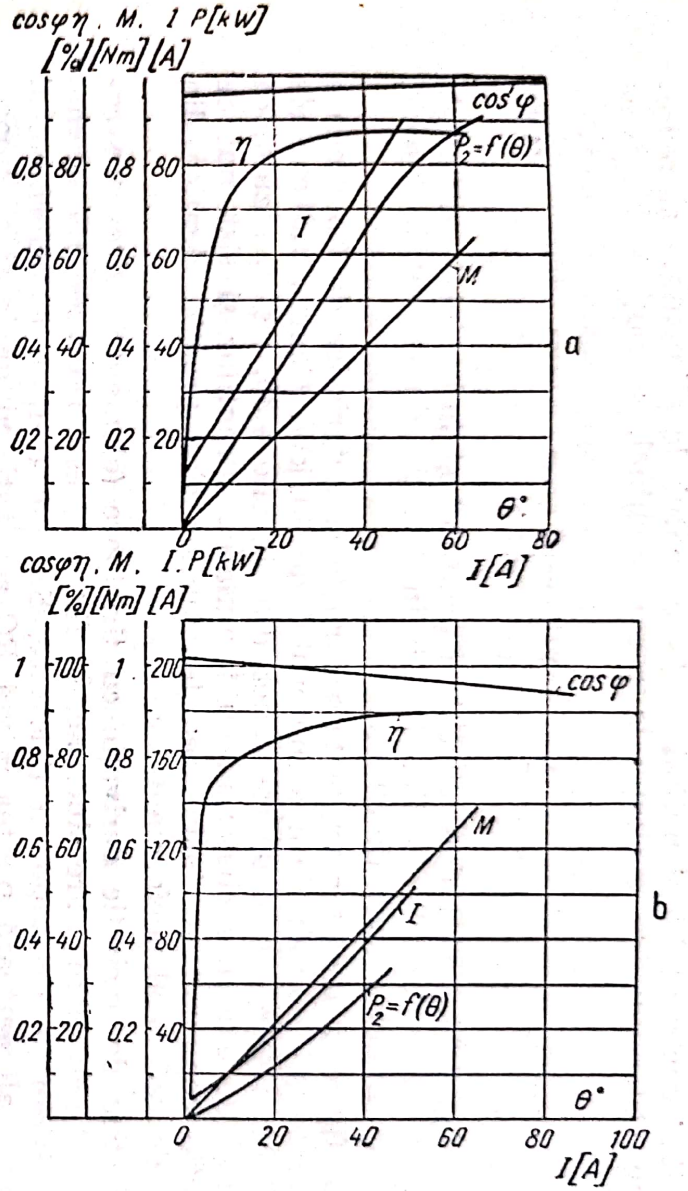


Fig. 4.35. Caracteristica de funcționare în sarcină, pentru un motor de 30 kW:

a — pentru schema din fig. 4.33, *a*; *b* — pentru schema din fig. 4.33, *b*.

Scanned with OKEN Scanner

Fiind cunoscut k_U și notînd cu I_{fN} curentul de alimentare al redresorului sistemului de excitație la regim nominal, se obține din relația (4.58)

$$k_T = \frac{I_{fN} - k_U Y U_1 \, e^{-j\alpha}}{I e^{-j\varphi}} \cdot \tag{4.61}$$

În fig. 4.34, *b* sînt date curbele curentului și inducției în diferitele elemente ale schemei din fig. 4.33, *b* în funcție de curentul statoric, pentru un motor sincron de 30 kW.

În fig. 4.35, *b* sînt reprezentate curbele caracteristice de funcționare și caracteristica unghiulară a motorului de 30 kW. Comparînd curbele din figurile 4.34, *a* și *b* de asemenea din figurile 4.35, *a* și *b* rezultă că sistemul de excitație compund cu însumarea curenților și sistemul de excitație compund cu însumarea tensiunilor sînt practic identice din punct de vedere al performanțelor.

Sistem de excitație derivație cu tiristoare (elemente redresoare comandate) **pentru motoare sincrone.** În fig. 4.36 este reprezentată schema unui sistem de excitație cu tiristoare. Schema conține transformatorul TP_1 care alimentează puntea mixtă *RC* realizată cu diode și tiristoare. Regulatorul *R* comandă tensiunea redresată aplicată înfășurării de excitație și servește la reglarea factorului de putere al motorului. Astfel, prin mărimile de intrare, tensiune și curent de la bornele motorului, pe

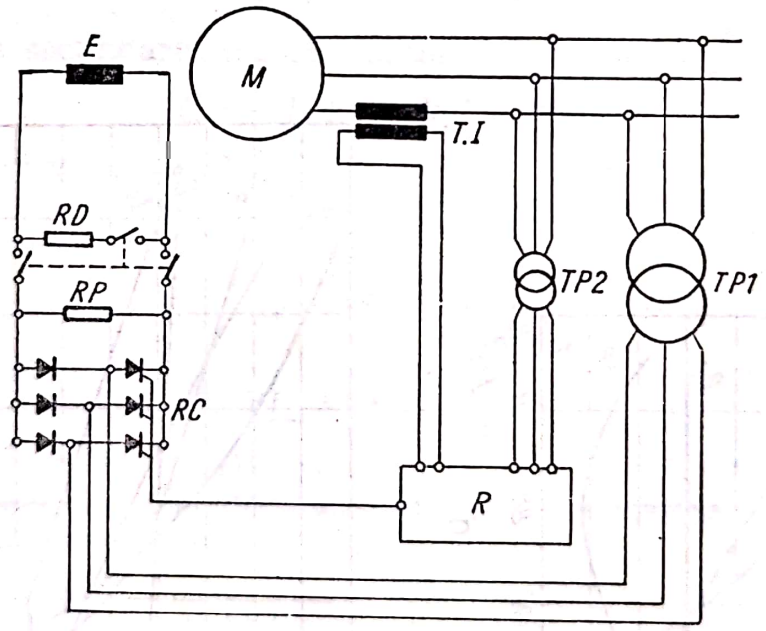


Fig. 4.36. Schema unui sistem de excitație cu tiristoare.

care regulatorul le obține prin intermediul transformatoarelor de tensiune și curent *TP2* și *TI*, se comandă grila tiristoarelor și se asigură ca motorul să debiteze pe rețea o anumită putere reactivă independent de variațiile tensiunii rețelei și ale puterii active a motorului. Această situație nu este realizată la schemele de excitație descrise anterior. În

Scanned with OKEN Scanner

general motoarele sincrone fac parte dintr-o instalație care conține motoare asincrone, care absorb puterea reactivă, și cîteva motoare sincrone de putere mare care dau putere reactivă. Schemele cu redresoare semiconductoare expuse mai înainte nu sînt cu totul satisfăcătoare, deoarece se poate întîmpla ca factorul de putere al instalației să scadă sub limitele admise din punct de vedere economic. Schemele descrise mai înainte nu permit remedierea acestei situații, care se soluționează însă prin schema din fig. 4.36.

Pentru a realiza în permanență un factor de putere ridicat la bornele instalației cuprinzînd motoare sincrone și asincrone, este necesar ca valoarea curentului de excitație al motoarelor sincrone să poată fi reglată în limite largi. De aceea este necesar să se utilizeze motoare în oarecare măsură supradimensionate, cu sistem de excitație derivație cu tiristoare, după cum s-a descris aici. Această soluție de ameliorare a factorului de putere, deși utilizează motoare supradimensionate, este în ansamblu mai economică decît aceea care constă în utilizarea de baterii de condensatoare.

Sistemul de excitație descris în fig. 4.36 poate fi prevăzut în plus cu un discriminator de abatere a tensiunii, care în condiții normale nu lucrează, dar care intră în funcție imediat ce tensiunea la bornele motorului scade cu peste 10%.

Fiabilitatea și performanțele îmbunătățite ale tiristoarelor realizate în ultimii ani permit să se realizeze scheme economice cu performanțe tehnice ridicate.

4.4.3. Sisteme de excitație cu redresoare rotative cu semiconductoare pentru motoare sincrone

Aceste sisteme conțin o excitatoare care este un generator sincron cu inductorul fix și indusul rotativ, de la care este alimentată înfășurarea de excitație printr-o punte redresoare care se învîrtește odată cu rotorul. Tensiunea continuă de alimentare a inductorului este obținută de la rețea, printr-un dispozitiv compund sau derivație, dar poate fi de asemenea obținută de la o sursă separată.

Indusul generatorului sincron, de la care se obține tensiune alternativă, și redresorul fiind montate pe rotor, nu mai sînt necesare perii și inele.

Instalarea dispozitivului redresor pe rotor poate fi efectuată în diferite moduri, de exemplu în modul din fig. 4.37.

În fig. 4.38 este reprezentată schema de principiu a sistemului de excitație cu redresoare rotative cu semiconductoare; deoarece această schemă nu conține inele și perii, este denumită și sistemul de excitație fără inele de contact și fără perii. Funcționarea sistemului decurge în modul următor. La funcționare normală, tensiunea de bornele înfășurării de excitație este mică și de o valoare inferioară pragului de tensiune al diodei Zener. Ca urmare, tiristorul T_1 a cărui aprindere este comandată de dioda Zener va fi blocat. Tiristorul T_1 fiind blocat, iar

Scanned with OKEN Scanner

dioda D fiind montată ca în figură în sens opus, curentul continuu nu poate trece prin rezistența de pornire.

În perioada de pornire, tiristorul T_2 nu permite trecerea curentului alternativ indus în înfășurarea de excitație prin redresor. În același interval de timp tiristorul T_1 conduce, astfel încît rezistența R este conectată la bornele înfășurării de excitație.

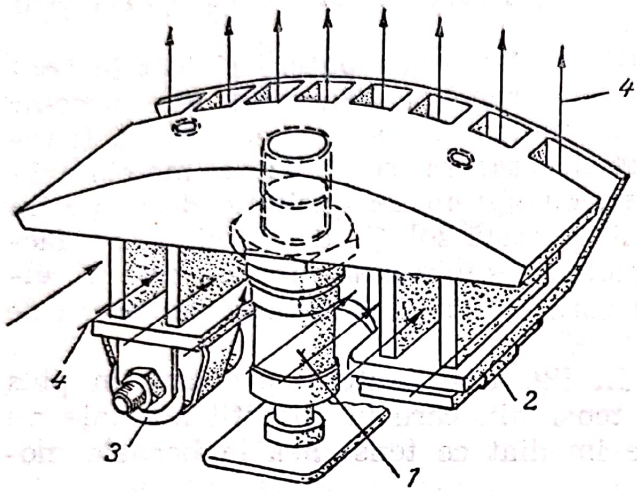


Fig. 4.37. Instalarea elementelor redresoare la o mașină sincronă cu poli aparenți:

1 — redresor cu siliciu; *2* — rezistență; *3* — sector de bronz; *4* — direcția de deplasare a aerului de răcire.

La sfîrșitul perioadei de pornire, dispozitivul de comandă DT comandă aprinderea tiristorului T_2 care permite trecerea curentului continuu în înfășurarea de excitație și comandă de asemenea prin intermediul diodei Zener blocarea tiristorului T_1, realizîndu-se deci deconectarea rezistenței de pornire.

Dispozitivul DT dă comenzile în funcție de îndeplinirea condițiilor următoare:

o turație suficient de apropiată de turația de sincronism (comandă blocarea tiristorului T_1);

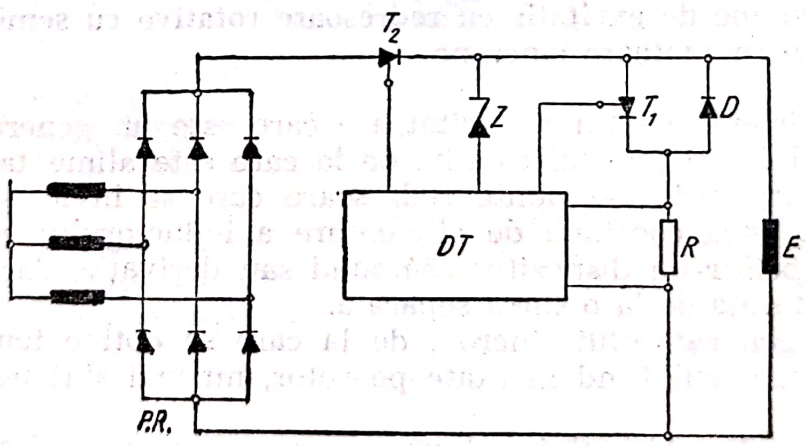


Fig. 4.38. Schema sistemului de excitație fără inele colectoare și fără perii:

E — înfășurarea de excitație a motorului sincron; *R* — rezistența de pornire; *PR* — punte redresoare; T_1 — tiristor pentru blocarea trecerii curentului prin rezistența de pornire în timpul funcționării normale, cu aprindere comandată de dioda Zener; T_2 — tiristor pentru blocarea trecerii curentului alternativ prin redresor, în timpul pornirii; *D* — diodă care permite trecerea unei singure alternanțe a curentului alternativ și nu permite trecerea curentului continuu de excitație; *Z* — diodă Zener; *DT* — dispozitiv de comandă tranzistorizat, care conectează tensiunea de excitație și elimină rezistența de pornire cînd sînt satisfăcute condițiile de sincronizare.

Scanned with OKEN Scanner

o valoare mică a curentului indus în inductor (comandă aprinderea tiristorului T_2).

Deoarece la un cuplu mic de sarcină, un motor se poate sincroniza sub acțiunea cuplului reactiv determinat de nesimetria circuitului magnetic, dispozitivul este prvăzut de asemenea cu un indicator de sincronizare.

În cazul apariției unei suprasarcini mari sau a unei căderi mari de tensiune se produce ieșirea mașinii din sincronism. Atunci în înfășurarea de excitație se induce o tensiune alternativă relativ mare, tensiunea depășind valoarea pragului de tensiune; dioda Zener comandă aprinderea tiristorului T_1, iar dispozitivul DT comandă blocarea tiristorului T_2. Ca urmare a aprinderii tiristorului T_1, rezistența de pornire este reintrodusă în circuitul de excitație, iar ca urmare a blocării tiristorului T_2, este întreruptă alimentarea înfășurării de excitație cu tensiune continuă.

După ce fenomenul care a provocat ieșirea din sincronism a dispărut, motorul reintră în sincronism cînd cele două condiții enumerate mai înainte sînt îndeplinite. Pentru ca aceste condiții să fie practic realizate, este necesar ca descărcarea motorului să se producă repede după ieșirea din sincronism, iar valoarea cuplului de intrare în sincronism să fie superioară cuplului rezistent din acel moment.

Sistemul de excitație fără inele de contact și perii prezintă următoarele avantaje: ventilație automată a elementelor semiconductoare; întreținerea simplă; eliminarea pericolului scînteierii la perii, ceea ce este deosebit de important în cazul funcționării în atmosferă explozivă; eliminarea schemei uzuale de sincronizare. Prezintă însă și dezavantaje: determinată de valoarea mare a constantei de timp a sistemului de excitație.
preț de cost ridicat al sistemului de excitație; viteză mică de răspuns;

4.5. ALEGEREA MAȘINII SINCRONE ÎN FUNCȚIE DE CONDIȚIILE DE EXPLOATARE

4.5.1. Generalități referitoare la tipurile constructive

După modul de așezare al polilor, mașina sincronă poate fi de două feluri: heteropolară, la care spirele indusului străbat cîmpuri care variază în spațiu de la o valoare maximă într-un sens pînă la aceeași valoare în sens contrar (cazul generatoarelor sincrone) și homopolară la care fluxul variază între o valoare maximă și valoarea zero (cazul generatoarelor sincrone de înaltă frecvență).

După modul de execuție a polilor, mașina sincronă poate fi cu poli aparenți (cînd bobinele polare sînt montate pe miezuri magnetice, distribuite radial pe o coroană polară) și cu poli înecați (cînd bobinele polare sînt repartizate în crestături pe periferia unui rotor cilindric).

Scanned with OKEN Scanner

Corelarea puterilor și turațiilor (seria unitară

Turațiile											
1 500 rot/min				1 000 rot/min				750 rot/min			
Tensiuni											
220/380	380	660	6 000	220/380	380	660	6 000	220/ 80	380	660	6 000
Puteri											
100	100	100		100	100	100		100	100	100	
125	125	125		125	125	125		125	125	125	
160	160	160		160	160	160		160	160	160	
200	200	200		200	200	200	200	200	200	200	200
250	250	250	250				250				250
320	320	320	320				320				320
			400				400				400
			500				500				500
			630				630				630
			800				800				800
			1000				1 000				

Mașina sincronă se construiește ca generator sincron (alternator) pentru frecvența normală; generator de înaltă frecvență, care este o mașină sincronă de construcție specială, destinată a produce curent alternativ de frecvență ridicată; motor sincron, și compensator sincron, care este o mașină sincronă ce funcționează ca motor în gol, supraexcitată, destinată să producă putere reactivă.

Mașina sincronă ca generator se construiește pînă la puteri foarte mari și este destinată să funcționeze în centralele electrice cuplată cu motoare cu explozie, turbine cu abur sau turbine hidraulice.

Generatorul sincron se utilizează și în cadrul unor grupuri electrogene ușor deplasabile.

Generatoarele sincrone de putere mare precum și generatoarele sincrone de frecvență înaltă nu fac obiectul acestei lucrări întrucît nu le considerăm mașini uzuale.

Cum generatoarele de putere mică se livrează în general în cadrul grupurilor electrogene, problema alegerii generatorului este de fapt problema alegerii grupului, în funcție de condițiile de exploatare.

Folosind unele elemente comune cu motoarele sincrone din seria MSA, în România se fabrică diferite generatoare sincrone; dintre cele mai frecvent utilizate sînt generatoarele sincrone tip GSA de 630 kVA și 1 000 kVA la 6,3 kV și 1 000 rot/min. Aceste generatoare sînt destinate grupurilor electrogene de turații mai ridicate, acționate în special de turbine hidraulice sau cu abur.

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 4.1

motoarelor sincrone
MSA)

nominale, rot/min							
600 rot/min				500 rot/min			
nominale, V							
220/380	380	660	6 000	220/380	380	660	6 000
kW							
100 125 160 200	100 125 160 200	100 125 160 200	200 250 320 400 400 630	100 125 160 200 250	100 125 160 200 250	100 125 160 200 250	200 250 320 400

Forma constructivă este asemănătoare cu a motorului MSA 6-200-250, 320 kW, 6 kV, 1 000 rot/min.

Probleme de exploatare sînt ridicate de motoarele sincrone, care de fapt sînt mașinile electrice sincrone cele mai uzuale și care au făcut și obiectul standardizării pentru limitarea tipodimensiunilor. În România s-a standardizat cu puteri, tensiuni și turații nominale, o serie de motoare sincrone trifazate normale de la 100 la 1 000 kW prin STAS 6991-64, astfel:

puteri nominale (kW): 100; 125; 160; 200; 250; 320; 400; 630; 800; 1 000;
tensiuni nominale (V): 220/380; 380; (500); 660; 6 000;
turații (rot/min): 1 500; 1 000; 750; 600; 500.

STAS-ul 6991-64 recomandă o corelare a puterilor motoarelor cu turațiile și tensiunile conform tabelului 4.1.

În mod practic în România se fabrică o serie de motoare sincrone trifazate cu poli aparenți cu autoventilație. Este vorba de seria unitară MSA cu poli aparenți.

4.5.2. Alegerea motoarelor sincrone

Pentru a corespunde în exploatare, în funcție de utilizare se va alege cel mai potrivit (cel mai apropiat) motor din gama standardizată, din punctul de vedere al puterii și turației.

Scanned with OKEN Scanner

Un alt criteriu în alegerea motorului sincron este cuplul maxim (de desprindere). Stabilitatea funcționării ca motor impune condiția

$$M < M_M,$$

în care M este cuplul care trebuie dat la o anumită sarcină, iar M_M — cuplul maxim al motorului.

De asemenea, un criteriu este stabilitatea în funcționare a motorului sincron. O măsură a stabilității o dă capacitatea de supraîncărcare

$$G = \frac{M_M}{M_n}.$$

Cea mai largă utilizare a motoarelor sincrone este la acționarea pompelor, ventilatoarelor și compresoarelor care necesită puteri mari, întrucît aceste agregate funcționează de obicei cu sarcini de durată și fără șocuri importante și deci nu solicită motorului de acționare o capacitate de supraîncărcare mare.

În ceea ce privește alegerea gradului de protecție, aceasta trebuie aleasă de la caz la caz, dat fiind faptul că agregatele deservite uzual (pompe, ventilatoare, compresoare) funcționează în medii foarte variate, de la mediul standard (aer curat), pînă la medii explozive și corozive sau, în condiții speciale, cum sînt combinațiile între mediile exploziv, coroziv și foarte umed (cazul funcționării pompelor de evacuarea apelor din unele mine).

Trebuie reținut avantajul că funcționarea motorului sincron în rețea poate îmbunătăți factorul de putere general al rețelei și că întrefierul mare al acestui motor aduce o siguranță sporită în exploatare.

4.6. PUNEREA ÎN FUNCȚIUNE A UNEI MAȘINI SINCRONE

4.6.1. Generalități referitoare la punerea în funcțiune

În cadrul industriei electrotehnice din România se construiesc tipuri de mașini sincrone care diferă între ele prin forma și dimensiunile de gabarit, determinate de grupul de protecție și de caracteristicile tehnice cerute de la aceste mașini.

Astfel, motoarele sincrone MSI-B 250 kW și 375 kW pentru 6 kV, 300 rot/min fabricate de Uzinele Electroputere Craiova, destinate să acționeze compresoarele de 30 m³/min, respectiv 15 m³/min, sînt asemănătoare cu motoarele din seria MSI, destinate tot pentru a acționa compresoare, cu următoarele deosebiri:

— gabaritul mult mai mare, deoarece sînt construite pentru a funcționa la tensiune înaltă (6 000 V) la un factor de putere capacitiv de 0,8;

— înfășurările statorice de izolație au clasa A.

În principiu, construcția mașinilor sincrone este aceeași indiferent de dimensiunile ce le ia această construcție, în funcție de putere și de

Scanned with OKEN Scanner

alți parametri. Bineînțeles, principiile se păstrează în cadrul celor două categorii de mașini sincrone: cu poli aparenți sau cu poli înecați.

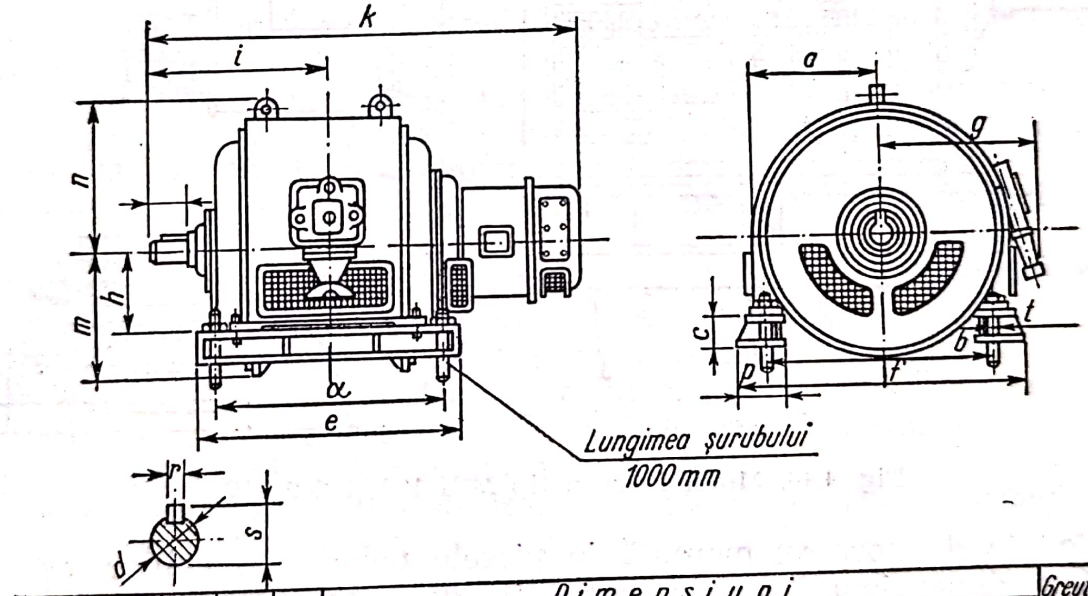
Pentru a putea pune în funcție și întreține o mașină sincronă este necesar să cunoaștem construcția și părțile mecanice și electrice ale mașinii precum și tehnica pornirii acesteia.

Pentru exemplificare, se vor considera motoarele sincrone din seria MSI fabricate în România, și anume motoarele sincrone tip MSI, 100 și 200 kW, 380 și 500 V, 300 rot/min.

Aceste motoare, construite pentru cuplare directă cu compresoare de aer cu piston, pot fi folosite și pentru alte acționări corespunzătoare puterilor lor nominale.

Motorul de 100 kW acționează în general compresoare de 15 m³/min iar cel de 200 kW de 30 m³/min, ambele fabricate de Uzina Combinatului Metalurgic Reșița.

Față de această destinație, s-au fabricat motoare sincrone cu o construcție robustă, singură în exploatare, cu moment de giratie (GD^2) mărit și cu posibilități pentru amortizarea cît mai bună a șocurilor, impuse de funcționarea compresoarelor.



Tipul	kw	rot/min	V	Dimensiuni a	b	c	d	e	f	g	h	i	k	l	m	n	o	p	r	s	t	Greut. kg.
MSI-100-99-5/20	100	300	380	865	1180	165	120	985	1400	780	400	712	1765	170	650	760	655	180	32	126,9	442	2700
MSI-200-99-10/20	200	300	380	1150	1180	165	120	1270	1400	780	400	855	2110	170	650	760	655	180	32	126,9	442	4000
MSI-100-99-5/20	100	300	500	865	1180	165	120	985	1400	780	400	712	1765	170	650	760	655	180	32	126,9	442	2700
MSI-200-99-10/20	200	300	500	1150	1180	165	120	1270	1400	780	400	855	2110	170	650	760	655	180	32	126,9	442	4000

Fig. 4.39. Dimensiunile de gabarit ale motoarelor sincrone de 100 și 200 kW.

Forma și dimensiunile de gabarit ale motoarelor sînt date în fig. 4.39.

Din punct de vedere constructiv, motoarele au carcasa sudată din tablă de oțel, iar scuturile sînt turnate din fontă (fig. 4.40).

Scanned with OKEN Scanner

Miezul statoric *1* este construit din tole de tablă silicioasă sub forma de pachete, prevăzute cu canale radiale de ventilație.

Rotorul *3* are poli aparenți, împachetați din tole ștanțate din tablă de 1,5 . . . 2 mm și fixați de butuc prin prezoane.

Butucul este turnat din fontă; el este apoi presat pe arborele motorului construit din OL 50 sau OLC 35 normalizat.

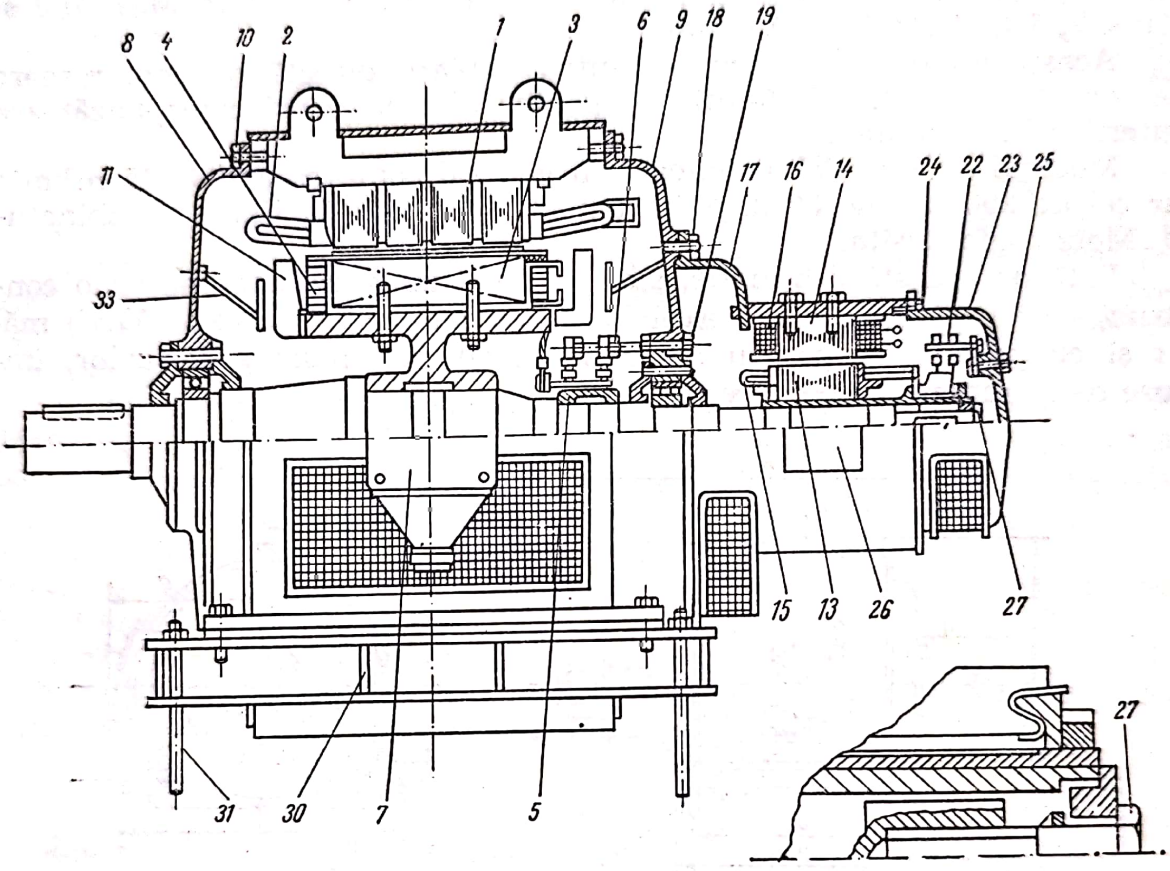


Fig. 4.40. Motor sincron tip MSI 100 și 200 kW.

Colivia de pornire, montată în piesele polare ale polilor, este din alamă și dimensionată pentru condițiile de pornire, servind în timpul funcționării la amortizarea șocurilor imprimate de compresor.

Înfășurarea statorică *2* din cupru profilat este izolată în clasa A, iar înfășurarea rotorică *4* din bandă de cupru este îndoită pe muchie și izolată tot în clasa A.

Fiecare bobină polară este fixată pe pol cu rame metalice asigurate prin bare transversale de susținere, prinse de pol cu șuruburi cu cap înecat.

Atît bobinajul statoric cît și cel rotoric sînt impregnate împotriva pătrunderii umezelii.

Pentru ventilația radială bilaterală a motorului sînt prevăzute două rînduri de palete *11* montate pe extremitățile butucului și găuri speciale prevăzute în butuc în spațiul dintre poli. Aerul intră frontal prin cele

Scanned with OKEN Scanner

două scuturi şi iese lateral prin ferestrele prevăzute în carcasă, fiind dirijat de două deflectoare *33* montate pe scuturi.

Inelele colectoare *5*, montate în interiorul maşinii, sînt construite din alamă sau bronz turnat.

Portperiile motorului *6* sînt prinse de bucşa rulment şi situate în partea de jos, în dreptul ferestrelor de vizitare practicate în scutul motorului şi scutul intermediar *17* de susţinere a excitatoarei.

Lagărele cu rulmenţi, montate în scuturi, au role în partea tracţiunii şi bile în partea excitatoarei.

Excitaţia motorului se face de la o excitatoare proprie în consolă în partea opusă tracţiunii.

Rotorul *13* al excitatoarei este împachetat şi bobinat pe o bucşă separată, apoi se montează pe consola arborelui cu ajutorul unui şurub special pentru presare şi extracţie *27*. Miezul magnetic al rotorului este din tole de tablă silicioasă.

Statorul *14* al excitatoarei cu carcasa din oţel turnat şi polii principali împachetaţi din tole de tablă de oţel, se fixează pe scutul *9* al motorului prin intermediul unui scut intermediar *17* sau direct.

În ultima construcţie (modernizată), aceste motoare au un sistem de ungere a rulmenţilor în timpul funcţionării fără demontarea căpăcelelor şi portperii.

Excitatoarea cu excitaţie derivaţie nu este prevăzută cu poli auxiliari; reglarea periilor în zona neutră se face uşor cu ajutorul a patru şuruburi *25* care fixează sistemul portperii de scutul frontal *23*.

Ventilaţia excitatoarei se face cu aerul tras tot de motor, prin spaţiile special prevăzute.

Excitatoarea are atît înfăşurarea statorică *16* cît şi înfăşurarea rotorică *15* izolate în clasa E şi impregnate corespunzător.

Protecţia întregii maşini este P21, conform STAS 625-56.

Pornirea motoarelor se face în asincron, prin conectare directă la reţea sau prin autotransformator. În ambele cazuri pornirea trebuie să se facă la sarcină redusă (cu compresorul în gol).

Conexiunea înfăşurării statorice, efectuată în interiorul maşinii, este stea pentru 380 V şi 500 V şi triunghi pentru 220 V, fiind scoase la placă doar trei borne.

Motoarele sînt prevăzute cu tălpi fixate de fundaţie în uzina constructoare.

Odată cu motorul (dacă este comandat pentru antrenarea compresorului), se mai livrează:

— celula de tip CITUC;

— rezistenţa de descărcare pentru înserierea ei în circuitul înfăşurării de excitaţie al motorului în perioada pornirii;

— reostatul de excitaţie al excitatoarei.

Cu compresorul se livrează:

— semicupla de pe arborele motorului;

— comutatorul bipolar pentru scoaterea rezistenţei de descărcare şi înserierea excitatoarei la sincronizare.

Scanned with OKEN Scanner

4.6.2. Transportul și depozitarea

Mașinile sincrone se transportă complet montate și ambalate, corespunzător condițiilor de transport precizate de beneficiar. Prinderea în macara se face fie în locurile indicate pe ambalaj, dacă mașina este ambalată, fie de inelele de ridicare prevăzute pe stator, dacă mașina este neambalată.

În cazul că mașina nu se montează imediat după sosire, atunci se vor lua măsuri speciale pentru depozitare.

Mașina se va păstra într-o încăpere curată și uscată, a cărei temperatură nu trebuie să coboare sub +3°C. În încăpere nu trebuie să pătrundă gaze caustice, praf conductor de electricitate sau alte substanțe vătămătoare.

Rulmenții trebuie bine unși, pentru a fi feriți de ruginire.

Pentru a se evita formarea petelor pe colector și pe inelele colectoare este necesar să se așeze sub portperii, prespan sau alt material izolant. Periile se vor scoate din locașul lor și se vor ambala în hîrtie parafinată.

Se va inspecta grupul la intervale regulate, iar ruginirea care eventual s-ar produce trebuie să fie imediat înlăturată.

Trebuie dată o atenție deosebită la transportul și depozitarea mașinilor, pentru a se evita deteriorări ale părților lor mecanice și electrice.

Mașinile destinate să funcționeze în regiuni tropicale, se ambalează corespunzător condițiilor climatice respective. Depozitarea pînă la montare se va face într-o încăpere curată, fiind interzisă depozitarea afară, sub cerul liber. Depozitarea se va face cu mașina ambalată. Nu se recomandă desfacerea ambalajului decît în cazul că există indicii de deteriorare a utilajului. Ambalajul va fi apoi refăcut în întregime, acordînd o deosebită atenție la învelișul interior din folii de polietilenă sau policlorură de vinil, care va fi perfect etanșat, după ce în prealabil s-a scos aerul din interiorul său, cu ajutorul unui aspirator de praf.

4.6.3. Montajul

Mașinile se montează pe o fundație solidă, într-o încăpere bine ventilată. Ele trebuie ferite de praf și mai ales de praf conductor de electricitate.

Bobinajele mașinilor, deși sînt impregnate pentru a rezista la umezeală, se recomandă să fie ferite de umezeală și îngheț pentru a mări siguranța lor în exploatare.

Înainte de pornire, se recomandă o verificare mecanică și o probă de funcționare în gol pentru a stabili eventualele deteriorări din timpul transportului.

Legarea mașinilor și a aparatelor de comandă, măsură și protecție la rețea se va face conform schemei de conexiuni.

Cînd mașina se va monta pe glisiere (transmisie prin curele), se vor prevedea cabluri de alimentare suficient de lungi și flexibile.

Scanned with OKEN Scanner

Mașinile și aparatajul lor trebuie legate de pămînt în conformitate cu prescripțiile în vigoare. Șurubul de legare la pămînt se găsește pe carcasă, lîngă cutia de borne.

Se recomandă ca mașinile să fie neapărat protejate cu automate de protecție cu relee termice, pentru a le feri de supraintensitate și mai ales de urmările grave ale rămînerii în două faze. Releul termic se va regla pentru curentul nominal al mașinii.

Generatoarele se vor proteja împotriva scurtcircuitelor prin relee cu declanșare instantanee reglată la $(1{,}6—1{,}8)I_n$.

O atenție deosebită trebuie acordată cuplării mașinilor. În cazul cuplării prin curea, atît șaiba mașinii antrenate cît și a celei de antrenare trebuie să fie bine echilibrate. Cureaua nu trebuie să fie prea întinsă, deoarece aceasta poate duce la frecarea rotorului de stator și la defectarea rulmenților. Partea de tracțiune a curelei va fi cea inferioară.

Cuplarea directă trebuie făcută cu multă grijă, stabilind o aliniere perfectă între axa mașinii antrenate și axa mașinii de antrenare.

Pentru verificarea alinierii axelor se recomandă *metoda acelor* (fig. 4.41).

De arborele fiecărei mașini (la partea acționării) se prinde solidar cu el cîte o piesă în formă de L, cu vîrful ascuțit (ace) conform fig. 4.41. Acele se aduc să fie vîrf la vîrf la o distanță a între ele. Se învîrtesc apoi cele două axe prinse rigid și se urmărește atent poziția vîrfurilor acelor.

Se pot întîmpla următoarele cazuri:

Acele nu au nici o deviație între ele; în orice poziție, ele sînt coaxiale și au aceeași distanță a între vîrfuri; în acest caz mașinile sînt bine centrate (fig. 4.42).

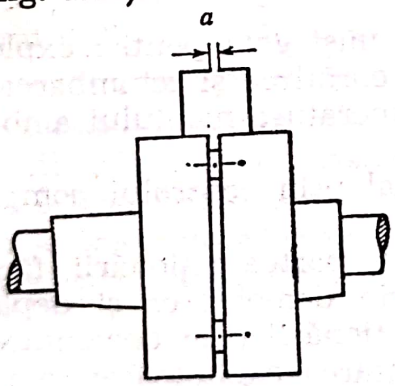


Fig. 4.41. Dispozitiv pentru verificarea alinierii mașinilor.

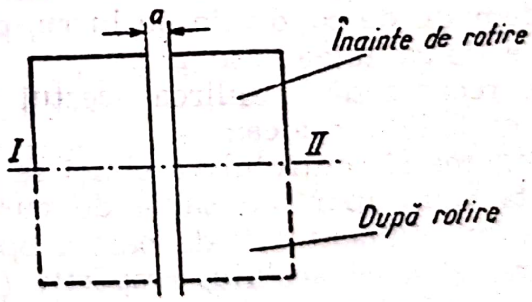


Fig. 4.42. Cazul cînd axele mașinilor sînt coaxiale.

Distanța între vîrfuri a rămîne constantă, dar în poziția inferioară sau laterală, unul din ace coboară sau se deplasează lateral, păstrînd totuși paralelismul între ele (fig. 4.43); în acest caz mașinile au axele paralele dar deplasate între ele; pentru remediere se deplasează spre interiorul acelor mașina care are acul la exterior, sau spre exteriorul acelor mașina care are acul la interior; în cazul din fig. 4.43, mașina I va trebui să fie ridicată.

Scanned with OKEN Scanner

Distanța între vîrfuri *a* variază și ea, iar acele fac între ele un unghi, unul din ele înclinîndu-se (fig. 4.44); în acest caz axele mașinilor fac între ele un unghi oarecare.

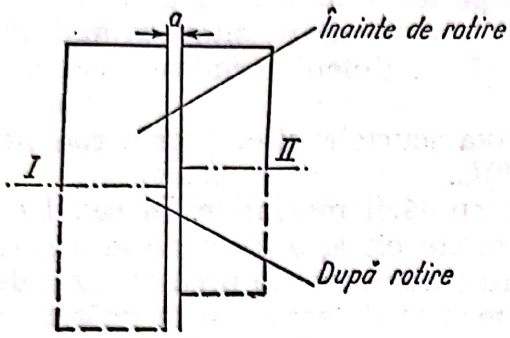


Fig. 4.43. Cazul cînd axele mașinilor sînt paralele, dar deplasate.

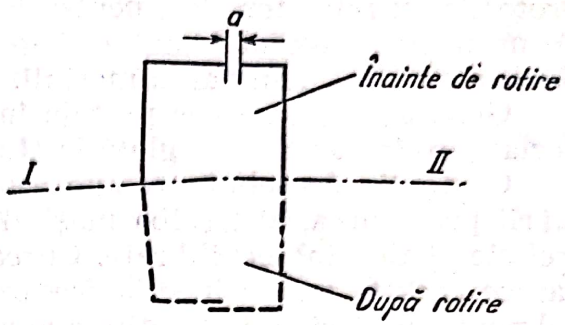


Fig. 4.44. Cazul cînd axele mașinilor fac un unghi.

În cazul din fig. 4.44 mașina *I* este înclinată spre partea excitatoarei. Pentru remediere, se așază adaosurile de tablă sub picioarele respective, pînă cînd acele devin coaxiale.

Mașinile vor fi bine centrate, astfel încît să nu transmită eforturi axiale una alteia.

4.6.4. Verificarea înainte de punerea în funcțiune

Înainte de punerea în funcțiune a mașinilor se recomandă o verificare generală, expusă în cele ce urmează:

Mașinile părăsesc fabrica cu rulmenții unși gata pentru exploatare. Intervalul de timp după care este necesară curățirea și schimbarea vaselinei depinde de condițiile de lucru, de temperatura mediului ambiant și mai ales de calitatea vaselinei.

Se recomandă stabilirea acestui interval prin controlul comportării vaselinei de la caz la caz.

Ungerea și controlul vaselinei se face: de partea acționării, fără a se demonta semicupla sau șaiba de curea, prin demontarea și deplasarea căpăcelului rulmentului; de partea opusă acționării prin demontarea excitatoarei și a căpăcelului respectiv (demontarea excitatoarei se face în cazul staționării de peste un an).

În condiții normale de funcționare și în cazul cînd vaselina este de bună calitate, schimbarea este necesară după un an, la o funcționare zilnică de 10 ore. Vaselina trebuie să îndeplinească următoarele condiții:

consistența la +20°C: moale și omogenă;

punctul de picurare: peste +100°C;

comportarea la —20°C: încă moale păstrînd proprietatea de ungere;

nu se admit urme de apă și corpuri solide în vaselină;

se recomandă vaselina tip RUL 165, STAS 1608-50;

pentru mașinile destinate să funcționeze în regiunile tropicale cu o climă caldă-umedă se recomandă utilizarea unsorii siliconice.

Scanned with OKEN Scanner

Se va verifica bătaia arborelui, a inelelor de contact și a colectorului cu ajutorul unui comparator, neadmițîndu-se o bătaie mai mare de 0,07 mm (a se vedea și documentația furnizorului).

Se va verifica, în cazul cuplării prin curele, tensiunea curelelor și paralelismul între axele mașinilor, măsurînd distanța dintre șaibe la ambele capete.

Se va verifica, în cazul cuplării directe, exactitatea centrării prin metoda acelor.

Se va verifica dacă periile fac contact pe toată suprafața cu inelele de contact și cu colectorul. Presiunea lor pe suprafața colectorului trebuie să fie de 180—200 g/cm².

Se va verifica întrefierul cînd este accesibil și dacă rotorul se învîrtește cu ușurință și nu prezintă blocări (la mașini deschise).

Se verifică dacă inelele de contact și colectorul excitatoarei sînt bine șlefuite. Se va da atenție deosebită izolației de micanită dintre lamelele de cupru ale colectorului, care trebuie să fie bine curățată și cu 1 mm sub nivelul lamelelor. Curățirea se va face cu o pînză de ferăstrău special pentru aceasta.

Dacă la colector apar bătăi mai mari de 0,07 mm ca urmare a unei uzuri parțiale pronunțate care favorizează producerea scînteilor, colectorul trebuie strunjit, șlefuit și recanelat.

Se suflă în interiorul mașinii prin grătarul scutului un aer uscat la o presiune maximă de 2 bari (aproximativ 2 at.). În lipsa aerului comprimat se poate efectua suflajul și cu foale de forje. Trebuie suflat astfel ca praful din mașină să fie scos în mediul ambiant.

Se verifică existența legăturii la pămînt.

Se efectuează verificarea rezistențelor de izolație ale diferitelor părți ale mașinii. Măsurarea rezistenței de izolație și a coeficientului de absorbție a înfășurării statorice se efectuează cu megohmmetrul de 2 500 V. Rezultatele măsurătorilor nu sînt normate. Valorile obținute nu trebuie să fie mai mici decît 70% din datele inițiale. În lipsa acestora se recomandă:

— pentru $U_n \geqq 1\,000$V: $R_{izol} \geqq \dfrac{U(V)}{1000 + \dfrac{S(kVA)}{100}}$ (MΩ);

— pentru $U_n \leqslant 1\,000$V; $R_{izol} \geqq 1$ MΩ.

Coeficientul de absorbție (R_{60}/R_{15}) nu este normat. Valoarea sa folosește pentru stabilirea necesității uscării înfășurării. Uscarea se face în cazul cînd $R_{60}/R_{15} < 1{,}3$, generatorul fiind nou sau scos din funcțiune de mult timp.

Rezistența de izolație a înfășurării rotorice, se măsoară cu megohmmetrul de 1 000 V. Rezultatele măsurătorilor nu sînt normate; ele se apreciază ca mai sus.

Scanned with OKEN Scanner

Măsurarea rezistenței de izolație față de masa mașinii a lagărelor generatoarelor sau compensatoarelor sincrone se face cu megohmmetrul sau cu voltmetrul după cum urmează:

— în timpul montajului: cu megohmmetrul de 1 000—2 500 V, avînd toate instalațiile de ungere montate; rezultatele măsurătorilor nu sînt normate. Valoarea măsurată trebuie să fie mai mare de 1 M la turbogeneratoare sau 0,3 MΩ la hidrogeneratoare;

— în timpul funcționării, măsurarea se face cu voltmetrul racordat direct sau prin transformator ridicător de tensiune; se măsoară tensiunile electromotoare induse de cîmpul magnetic de scăpări între capetele arborelui și între corpul lagărului și placa de fundație; tensiunile măsurate pe fiecare element (lagăr) trebuie să fie egale între ele. Valoarea lor nu este normată.

Rezistența de izolație a buloanelor de strîngere se măsoară cu megohmmetrul de 2 500 V. Rezultatele măsurătorilor nu sînt normate. Valorile obținute nu trebuie să fie mai mici de cît 70% din datele inițiale.

Măsurarea rezistenței de izolație a traductoarelor de temperatură se realizează cu ajutorul megohmmetrului pînă la 500 V. Rezultatele măsurării nu sînt normate. Ele se compară cu datele inițiale.

Încercarea izolației înfășurării statorice la masă (fundația sau fierul statorului) se face pentru fiecare fază (ramură) separat, celelalte faze fiind legate la masă, cu tensiune alternativă mărită (50 Hz).

Valoarea tensiunii de încercare rezultă din tabelul 4.2.

Tabelul 4.2

Tensiunile de încercare a izolației

Puterea generatorului kVA	Tensiunea nominală între faze kV	Tensiunea eficace de încercare kV
Între 3 și 1000	Peste 0,36	$0{,}75(2U_n+1)$, nu mai mică de 1,5
Peste 1000	Pînă la 3,3 inclusiv	$0{,}75(2U_n+1)$
	3,3—6,6	$0{,}75 \cdot 2{,}5U_n$
	Peste 6,6	$0{,}75(2U_n+3)$

În cazul rebobinării, la locul instalării, în locul coeficientului 0,75 se va aplica coeficientul 0,85.

Durata menținerii tensiunii de încercare este de un minut.

În cazul cînd nu se dispune de instalații de încercare cu tensiune alternativă de parametri corespunzători, se poate face încercarea cu tensiune mărită redresată. În acest caz:

$$U_{înc.\ c.\ c.} \approx 1{,}6\ U_{înc.\ c.\ a.}$$

Scanned with OKEN Scanner

Valorile curentului de scurgere nu sînt normate, ele se compară cu valorile prescrise de fabrică. În timpul probei, se vor urmări şi se vor nota cîteva valori intermediare, corespunzătoare unor tensiuni cuprinse între U_n şi $U_{înc.\ c.c.}$ pentru controlarea permanentă a curbei $I_{scurgere} = f(U_{aplic})$ în vederea evitării străpungerii izolaţiei (apariţia cotului curbei).

În cazul în care sistemul de răcire este cu mediu lichid, încercarea se va face cu instalaţia de răcire în funcţiune. Încercarea cu tensiune mărită se face după uscarea generatoarelor sau compensatoarelor, dacă aceasta este necesară.

Pentru încercarea izolaţiei între spirele înfăşurării statorice cu tensiune alternativă mărită valoarea tensiunii de încercare este:

— 1,5 U_n pentru hidrogeneratoare,

— 1,3 U_n pentru turbogeneratoare şi alte alternatoare.

Durata menţinerii tensiunii de încercare este de 5 minute. Frecvenţa tensiunii de încercare nu este normată.

Încercarea izolaţiei înfăşurării rotorice cu tensiune alternativă mărită se face numai la generatoarele sau compensatoarele cu poli aparenţi. Valoarea tensiunii de încercare este:

$$U_{înc} = 10\ U_{n\ ex},$$

în care $U_{n\ ex}$ = tensiunea nominală de excitaţie, dar 1 500 V $\leq U_{înc} \leq$ 3 500 V.

Durata menţinerii tensiunii de încercare este de 1 minut. În cazul în care sistemul de răcire este cu mediu lichid, încercarea se va face cu instalaţia de răcire în funcţiune. Se recomandă ca încercarea să se facă la turaţia nominală a rotorului.

Încercarea izolaţiei între spirele înfăşurării rotorice cu tensiune alternativă mărită se execută numai la generatoarele sau compensatoarele cu poli aparenţi. Valoarea tensiunii de încercare: $U_{înc} = 2{,}5$ V/spiră. Durata menţinerii tensiunii de încercare este de 5 minute. Frecvenţa tensiunii de încercare nu este normată.

Încercarea izolaţiei circuitelor de excitaţie (fără înfăşurările rotorului şi excitatoarei) cu tensiunea alternativă mărită: se încearcă tot circuitul de excitaţie, cu aparatele montate. În cazul în care există aparate care au tensiune de încercare inferioară celei a circuitului de excitaţie, se vor încerca separat, iar în timpul probei se vor izola. Valoarea tensiunii de încercare este de 1 000 V. Durata menţinerii tensiunii de încercare este de 1 minut.

Se măsoară rezistenţele active ale înfăşurărilor statorice şi rotorice. Rezultatele măsurărilor pe fiecare fază şi ramură în stator nu trebuie să difere cu mai mult de 2% între faze — pentru puteri pînă la 100 MW sau cu mai mult de 1% — pentru puteri peste 100 MW. Se admit abateri pînă la 5% pentru ramuri (la generatoare cu mai multe înfăşurări pe aceeaşi fază) şi acolo unde particularităţile constructive justifică aceasta. În cazul în care există date din fabrică sau date iniţiale, rezultatele nu trebuie să depăşească diferenţele cauzate de temperaturi şi de clasa de precizie a aparatelor de măsură folosite.

Rezultatele măsurătorii rezistenţei înfăşurării rotorice nu trebuie să difere cu mai mult de 2% faţă de datele din fabrică sau iniţiale.

Scanned with OKEN Scanner

La rotoarele generatoarelor sau compensatoarelor cu poli aparenți se măsoară rezistența totală, pentru care se admite o diferență de 2%. Se recomandă și măsurarea rezistenței înfășurării fiecărui pol în parte precum și a contactelor între înfășurări. Se recomandă ca la rotoarele generatoarelor de putere mare (peste 50 MW și care au rezistență mică (sub 0,2 Ω) să se măsoare și impedanța înfășurării la frecvență industrială. Întrucît la aceste măsurări forma curbei tensiunii folosite pentru măsurare are o mare importanță, se vor lua măsuri speciale pentru evitarea deformării acesteia. Rezultatele acestei măsurători nu sînt normate. Se recomandă ca impedanța înfășurării rotorice să se măsoare prima dată cu rotorul scos, iar apoi după montare, în poziții diferite și la turații diferite, inclusiv turația nominală.

Măsurarea rezistenței active a rezistenței de stingere a cîmpului (rotor și excitatoare) nu trebuie să dea rezultate care să difere cu mai mult de 10% față de datele inițiale sau din fabrică. Se vor măsura și rezistențele de stingere din circuitul excitatoarei, în cazul în care acestea există.

Se măsoară și rezistența reostatului de excitație, atît partea reglabilă pe fiecare plot, cît și partea fixă (în cazul cînd există). Rezultatele măsurătorilor nu sînt normate. Ele se compară cu datele din fabrică sau inițiale. Se urmărește, de asemenea, ca sensul de variație al rezistenței să corespundă cu variația tensiunii atunci cînd se manevrează de la pupitru.

Verificarea polarității înfășurărilor se face cu metoda în curent continuu. Polaritatea unei faze trebuie să fie inversă față de celelalte două. Polaritatea unei ramuri (căi) de curent trebuie să fie identică cu toate celelalte din aceeași fază. Denumirea fazelor generatorului trebuie să corespundă cu cea a fazelor sistemului la care se racordează.

Măsurarea principalilor parametri electrici ai generatoarelor sau compensatoarelor sincrone, după învîrtirea lor la turația nominală se face pe baza ridicării principalelor curbe caracteristice, și anume:

— caracteristica de scurtcircuit trifazat la bornele generatoarelor sau compensatoarelor sincrone; se ridică curba $I_{3k}=f(I_{ex})$;

— caracteristica de funcționare în gol se poate asocia cu încercarea izolației între spirele înfășurării statorice prevăzute mai înainte; se ridică curba $U_{stator}=f(I_{ex})$.

Se verifică simetria sistemului de tensiuni produse de generatorul sau compensatorul sincron. Se măsoară tensiunile pe fază și între faze la secundarele transformatoarelor de tensiune. Se determină succesiunea fazelor care trebuie să coincidă cu cea a sistemului la care se conectează generatorul.

Se măsoară tensiunea remanentă a generatorului la turația nominală și cu circuitul de excitație întrerupt (*ADR* — sistemul de anclanșare și de declanșare rapidă — declanșat). Măsurarea se face direct la bornele generatorului. Se admite și măsurarea în circuitele secundare ale transformatoarelor de tensiune. Rezultatele măsurării nu sînt normate: ele rămîn ca valori inițiale.

Se măsoară timpul de stingere a cîmpului magnetic din circuitul rotoric. Se ridică curba $U_{gen}=f(t)$ din momentul deconectării circuitului rotoric.

Scanned with OKEN Scanner

Se urmărește vizual comportarea sistemului *ADR* și se repetă de 3—5 ori această probă, pentru diverse valori ale curentului rotoric. Timpul de stingere este normat.

Abaterile față de caracteristicile indicate de fabrică sau datele inițiale nu trebuie să depășească limitele de precizie ale instrumentelor folosite.

Acolo unde condițiile tehnice permit, volumul probelor sau caracteristicile ridicate pot fi majorate sau reduse, în funcție de condițiile specifice sau posibilitățile locale. Se recomandă ca în timpul probelor să se consemneze și alte mărimi auxiliare, dacă există instrumentele de măsură montate.

Măsurarea întrefierului dintre rotor și stator se face cu aparate mecanice, în 4—8 puncte diametral opuse unde prin construcție întrefierul este accesibil.

Valorile obținute nu trebuie să difere de semisuma lor cu mai mult decît:

$\pm 10\%$ pentru turbogeneratoare,
$\pm 20\%$ pentru hidrogeneratoare.

Verificarea la presiune a instalației de răcire se efectuează cu o presiune egală cu de două ori presiunea nominală, dar nu mai mică de 3 bar (aproximativ 3 ata) pentru instalații de răcire cu aer și 5 bar (aproximativ 5 ata) pentru instalații de răcire cu hidrogen. Durata încercării este de 10 minute. Nu trebuie să apară scăpări de gaze.

Măsurarea pierderilor de presiune în instalația de răcire se realizează cu ajutorul manometrelor. Pierderile de presiune nu trebuie să depășească valorile prescrise de fabrică, în documentație.

Măsurarea vibrației lagărelor la generatoare, compensatoare sincrone și anexe, pentru hidrogeneratoare verticale, se fac prin măsurări încrucișate (în mai multe puncte). Vibrațiile nu trebuie să depășească valorile:

Turația nominală rot/min	3000	1500	1000—500	375—214	187—62,5
Amplitudinea vibrației mm	0,05	0,07	0,1	0,12	0,18

În cursul exploatării, pentru turbogeneratoare în afara valorilor indicate mai sus, vibrațiile se mai pot aprecia după următoarele criterii:

Calificative		Foarte bine	Bine	Satisfăcător
Vibrația lagărelor, mm (amplitudinea)	1500 rot/min	sub 0,03	sub 0,05	sub 0,07
	3000 rot/min	sub 0,02	sub 0,03	sub 0,05

Scanned with OKEN Scanner

Valorile pentru mărimea vibrațiilor, sînt valabile în cazul cînd nu sînt date alte indicații, din partea fabricii constructoare.

Verificarea instalației de ecranare a bornelor și a barelor de ieșire din generator constă din:

verificarea legăturilor la pămînt, conform proiectului;

verificarea izolației între îmbinările tronsoanelor; se face cu megohmmetrul de 1 000 V.

Rezistența de izolație trebuie să fie mai mare de 2 MΩ.

După aceste verificări mașina va fi pornită în gol pentru șlefuirea periilor, așezarea rulmenților și constatarea eventualelor defecte (centrare necorectă, supraîncălziri locale, zgomotele rulmenților etc.).

Verificările se referă la mașini de putere mare. Pentru mașinile de putere mijlocie programul se reduce, fără a exclude verificările cuplajului, contactelor alunecătoare, legătura la pămînt, rezistențele de izolație, a înfășurărilor, vibrațiilor etc.

4.6.5. Uscarea mașinilor sincrone

Mașinile noi, cum și mașinile care au stat timp îndelungat în stare de nefuncționare, înainte de a fi puse în funcțiune trebuie să fie supuse uscării.

Se recomandă următoarele mijloace de uscare: prin curent de scurtcircuit, prin curent continuu sau alternativ și prin încălzire exterioară.

Principiile generale care duc la o bună uscare, oricare ar fi mijlocul prin care se face acest lucru, sînt următoarele:

— temperatura trebuie ridicată treptat la valoarea sa maximă de 70°C la măsurarea cu termometrul și de 90°C, la măsurarea prin metoda rezistenței, după 5—6 ore;

— se recomandă ridicarea curbei temperaturii din 15′ în 15′ pînă la stabilizarea ei și apoi din oră în oră;

— termometrele trebuie să aibă rezervorul cu mercur înfășurat în staniol, și apoi acoperit cu vată sau pîslă;

— se vor instala în mod obligatoriu termometre la înfășurarea statorică și mai ales în gaura filetată din carcasă, în care se înșurubează inelul de ridicare;

— se va căuta ca mașina să fie ventilată, pentru a se grăbi procesul uscării; ventilația nu va fi însă puternică, pentru a nu împiedica urcarea temperaturii la limita necesară;

— în timpul uscării se măsoară rezistența izolației cu un megohmmetru care trebuie să aibă tensiunea de 500 V pentru mașinile de joasă tensiune și 1 000 V pentru cele de tensiune înaltă;

— se continuă cu procesul de uscare pînă cînd rezistența izolației devine constantă, în raport cu timpul; la începutul uscării rezistența izolației scade din cauza evaporării apei și apoi crește pînă rămîne constantă;

— rezistența minimă a izolației, pentru stator, la o temperatură de +75°C trebuie să fie de 1 MΩ pentru mașinile pînă la 1 000 V și cîte

Scanned with OKEN Scanner

1 MΩ pentru fiecare kilovolt de tensiune nominală, iar pentru rotor 0,5 MΩ; durata uscării mașinii este de 15—20 ore.

Uscarea prin curent de scurtcircuit. Toate trei fazele se scurtcircuitează prin ampermetre. Se recomandă ca scurtcircuitul să fie făcut pînă la întreruptorul în ulei. Se învîrtește mașina la o turație redusă și se reglează curentul de excitație astfel ca în stator să treacă jumătate din curentul nominal. După un timp se crește curentul, avînd însă grijă să nu depășească pe cel nominal, pentru a nu produce supraîncălziri locale. În tot acest timp se va avea grijă ca mașina să fie în mod sigur legată la pămînt.

Rotorul mașinii sincrone nu necesită o uscare separată, deoarece el se usucă odată cu statorul.

Uscarea prin curent continuu sau alternativ. Dacă se dispune de o sursă de curent continuu sau alternativ de tensiune joasă, atunci uscarea se poate face fără a se învîrti rotorul.

Se leagă toate fazele generatorului în serie, introducînd în circuit o rezistență variabilă corespunzătoare tensiunii la dispoziție și curentului nominal al mașinii. Cu această rezistență se limitează și se variază curentul în mașină, pentru a respecta urcarea treptată a temperaturii și limita ei maximă, așa cum cer condițiile generale expuse anterior.

Dacă sursa este de curent alternativ trifazat, atunci mașina poate fi pornită în regim de compensator și uscată în acest regim.

Mașinile puternic umede nu se recomandă a se usca prin curent continuu, deoarece pot apărea efecte electrolitice.

Uscarea prin încălzire exterioară. Aceasta se face suflînd aer cald uscat asupra mașinii, în special în interiorul ei.

Temperatura aerului nu trebuie să fie mai mare de 70—90°C.

4.6.6. Pornirea, funcționarea și oprirea generatoarelor sincrone

Generatorul funcționează separat. Pornirea se face în următoarele etape:

— generatorul și excitatoarea se leagă la tabloul de comandă, conform schemei de conexiuni;

— rețeaua se leagă la bornele respective ale tabloului;

— indicatorul de la maneta reostatului de excitație al excitatoarei trebuie să fie la poziția „minimum";

— se face o verificare a tabloului pentru a constata dacă aparatele și dispozitivele funcționează în bune condiții și dacă întreruptorul principal este deconectat;

— se pornește mașina primară și se aduce generatorul la turația lui nominală;

— se micșorează treptat rezistența de excitație (prin învîrtirea manetei în sensul săgeții marcată pe reostat) pînă cînd voltmetrul tabloului arată tensiunea nominală;

Scanned with OKEN Scanner

— se conectează generatorul la rețea prin întreruptorul principal;
— se introduce treptat sarcina, urmărind ca turația să rămînă constantă prin reglarea cuplului motor al mașinii primare și totodată menținînd tensiunea generatorului constantă, reglînd curentul de excitație.

La oprire se procedează astfel:

— se scoate treptat sarcina, reducînd în același timp cuplul motor și mutînd maneta reostatului spre zero, cînd tensiunea generatorului va fi minimă;
— se deconectează generatorul de la rețea;
— se oprește mașina primară;
— se face o examinare exterioară și se pregătește pentru pornirea viitoare.

Generatorul funcționează în paralel cu alt generator. Pornirea se face astfel:

— generatorul și excitatoarea se leagă la tabloul de comandă, conform schemei de conexiuni;
— se verifică dacă toate întreruptoarele din rețeaua principală sînt deconectate și dacă aparatele și dispozitivele funcționează în bune condiții;
— se verifică dacă indicatorul de la maneta reostatului de excitație este la poziția „minimum";
— se pornește mașina primară și se aduce la turația nominală;
— se micșorează treptat rezistența de excitație (prin învîrtirea manetei reostatului în sensul săgeții), pînă ce voltmetrul arată aceeași tensiune ca a rețelei;
— se va regla turația grupului astfel încît tensiunea generatorului și a rețelei să coincidă în fază și deci să se sincronizeze;
— prinzînd momentul de sincronizare, se cuplează întreruptorul principal;
— pentru transmiterea sarcinii generatorului cuplat în paralel, se acționează asupra regulatorului mașinii primare, majorînd cuplul motor, și asupra reostatului de excitație, micșorînd rezistența;
— pentru scoaterea sarcinii se procedează în sens invers, micșorînd cuplul motor și mărind rezistența de excitație;
— în timpul manipulărilor pentru transmiterea sarcinilor se vor urmări cu atenție indicațiile voltmetrelor și ampermetrelor.

Oprirea se realizează astfel:

— se scoate sarcina după indicațiile de mai înainte;
— cînd generatorul este descărcat (curentul statorului este zero), se deconectează întreruptorul principal;
— după deconectare se va micșora tensiunea și se va opri mașina primară;
— se vor deconecta toate întreruptoarele, se va face o examinare exterioară și se pregătește pentru viitoarea pornire.

Alegerea momentului de conectare a generatorului la rețea se face cu ajutorul unei instalații de sincronizare. Sub forma cea mai simplă această instalație este constituită din trei lămpi montate pe un panou în vîrfurile unui triunghi echilateral și se utilizează una din metodele cu-

Scanned with OKEN Scanner

noscute şi anume: fie metoda cuplării prin stingere, fie metoda cuplării prin aprindere.

În cazul tensiunilor înalte, lămpile se leagă prin intermediul unor transformatoare, care trebuie să aparţină toate aceleiaşi grupe de conexiuni.

În prezent, exceptînd cazuri izolate, cuplarea se face cu instalaţii de sincronizare automată, în care reglarea diferitelor mărimi este comandată prin relee speciale, iar succesiunea operaţiilor este asigurată prin sisteme de blocare.

Dacă se admit variaţii relativ mari ale tensiunii şi curentului reţelei, sincronizarea se poate efectua fără instalaţii speciale de sincronizare utilizînd metoda de cuplare la reţea în asincron a generatorului sincron, denumită şi autosincronizare. Se procedează în modul următor: generatorul sincron este adus aproape de turaţia de sincronism cu ajutorul motorului primar şi este conectat la reţea fără a fi excitat. Trebuie verificat în prealabil că sensul de rotaţie a generatorului sincron şi succesiunea fazelor reţelei sînt asociate corect. În acest timp înfăşurarea de excitaţie este scurtcircuitată sau închisă pe o rezistenţă. După ce generatorul a fost conectat la reţea, se aplică o tensiune de excitaţie şi se stabileşte un curent continuu în înfăşurarea de excitaţie. Ca urmare apare cuplul electromagnetic al maşinii sincrone şi se produce sincronizarea. Apoi se deschide admisia de agent motor a motorului primar şi se reglează această admisie şi curentul de excitaţie, pînă cînd generatorul este încărcat cu puterea dorită. Această metodă de cuplare la reţea este utilizată în cazurile în care amplitudinea şi frecvenţa reţelei variază brusc, deci au loc perturbări care fac deosebit de dificilă sau uneori imposibilă conectarea prin metoda de sincronizare descrisă mai înainte, şi nu necesită aparatură de automatizare complicată.

Aceste metode de sincronizare sînt tratate detailat în lucrări speciale consacrate acestui subiect.

4.6.7. Pornirea, funcţionarea şi oprirea motoarelor sincrone

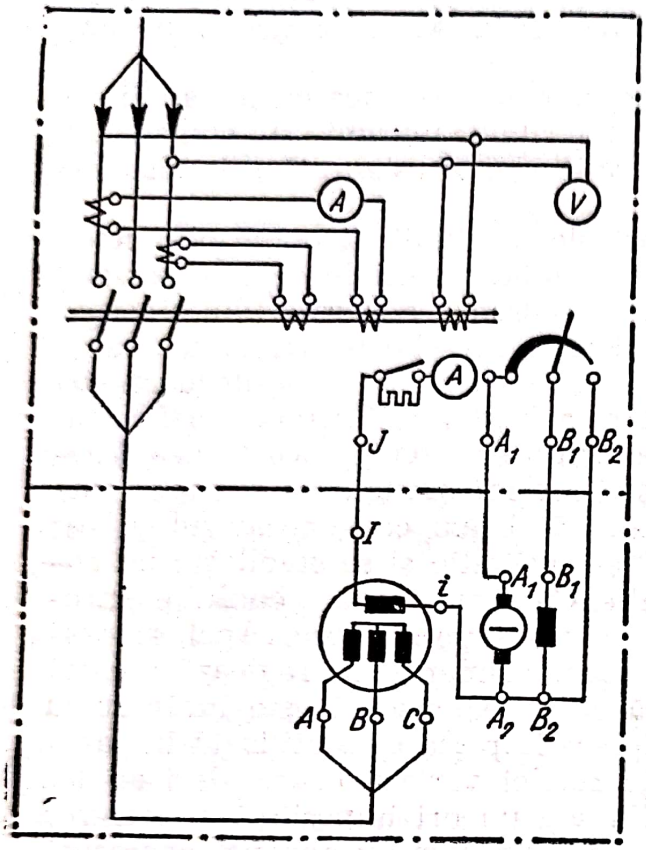
Pornirea motoarelor sincrone se recomandă a se face în asincron, fie prin conectarea directă la reţea, fie prin autotransformator.

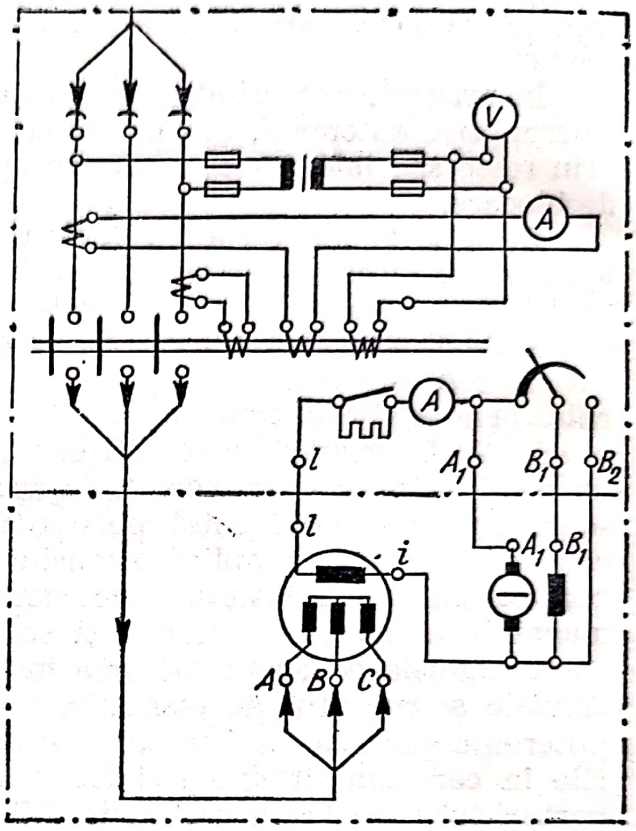
Pornirea prin conectare directă la reţea (figurile 4.45 şi 4.46) se realizează prin cuplarea înfăşurării statorului la reţeaua de tensiune nominală.

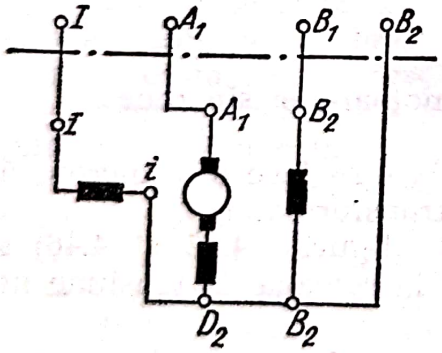
Conectarea la reţea se face numai după ce înfăşurarea de excitaţie a motorului a fost închisă în prealabil pe o rezistenţă de descărcare. După ce se atinge turaţia maximă, lucru ce se constată fie după sunete — care încetează de a mai creşte, fie după curentul statorului sau frecvenţa rotorului — care încetează să mai scadă, se cuplează înfăşurarea de excitaţie pentru alimentarea cu curent continuu.

Durata desfăşurării procesului de pornire depinde de cuplul motorului, de cuplul rezistent şi de momentul volant al rotorului şi al mecanismelor acţionate.

Scanned with OKEN Scanner

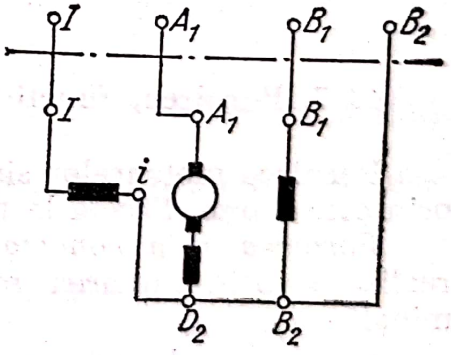






Marcarea bornelor la excitatoarele cu poli auxiliari

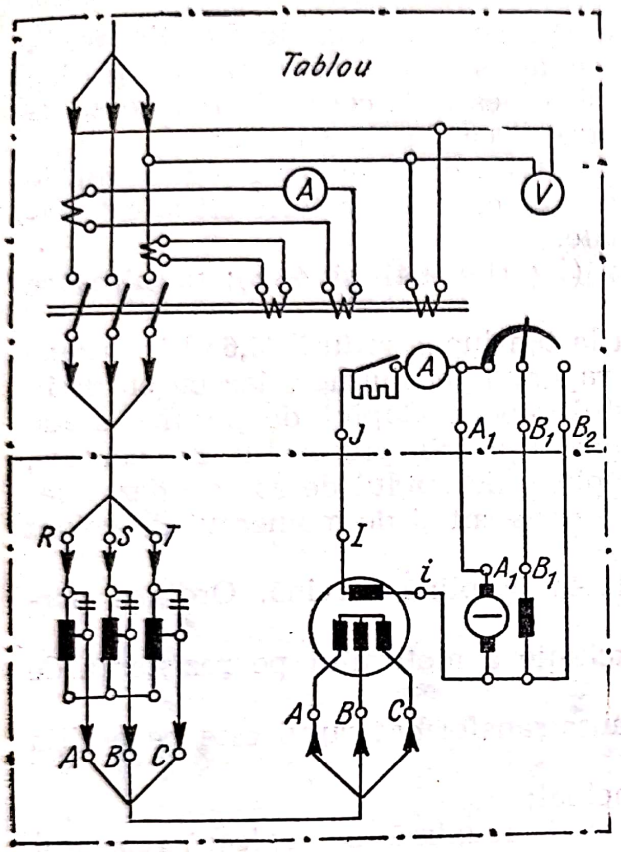
Fig. 4.45. Pornirea motoarelor sincrone de joasă tensiune, prin conectare directă la rețea.

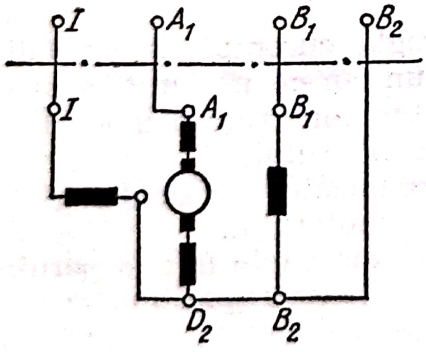


Marcarea bornelor la excitatoarele cu poli auxiliari

Fig. 4.46. Pornirea motoarelor sincrone de înaltă tensiune, prin conectare directă la rețea.

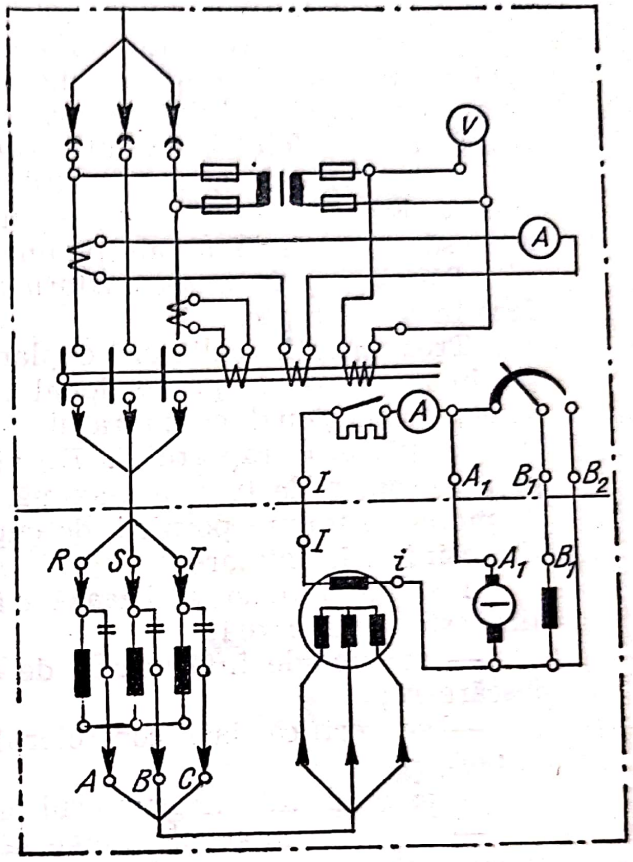
Scanned with OKEN Scanner

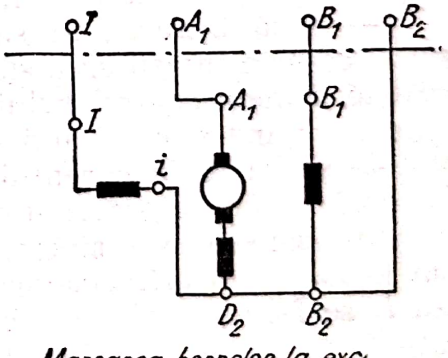




Marcarea bornelor la excitatoarele cu poli auxiliari

Fig. 4.47. Pornirea motoarelor sincrone de joasă tensiune prin autotransformator.





Marcarea bornelor la excitatoarele cu poli auxiliari

Fig. 4.48. Pornirea motoarelor sincrone de înaltă tensiune prin autotransformator.

Scanned with OKEN Scanner

Ordinea pornirii este următoarea:

— înfăşurarea de excitaţie se închide pe rezistenţa de descărcare, iar circuitul care vine de la excitatoare se întrerupe;

— se cuplează motorul la reţea;

— se aduce reostatul la poziţia pentru excitaţia de funcţionare a motorului şi apoi, după ce motorul a atins viteza maximă, se închide întreruptorul circuitului de excitaţie şi se deschide cel de la rezistenţa de descărcare; în felul acesta motorul intră direct în sincronism;

— se reglează apoi curentul de excitaţie după puterea şi factorul de putere dorit; totodată se urmăreşte ca atît curentul rotoric cît şi cel statoric să nu depăşească valorile nominale.

Pornirea prin autotransformator (figurile 4.47 şi 4.48); pornirea se face în două trepte.

Treapta întîi realizează cuplarea la tensiunea redusă (0,64 U). Curentul în motor scade proporţional cu raportul tensiunilor, iar curentul în reţea, proporţional cu pătratul acestui raport. Cuplul de pornire scade tot cu pătratul raportului. Durata desfăşurării procesului de pornire, pînă se ajunge la turaţia maximă, depinde de cuplul de rotaţie dezvoltat de motor în timpul pornirii, de cuplul rezistent şi de momentul de volant al maşinilor în mişcare.

Treapta a doua realizează cuplarea la plină sarcină. Ordinea pornirii este următoarea:

— se închide înfăşurarea de excitaţie a motorului pe rezistenţa de descărcare;

— se verifică dacă controlerul autotransformatorului este pe poziţia de pornire;

— se cuplează întreruptorul principal;

— după ce motorul ajunge la turaţia maximă, se reglează reostatul de excitaţie pentru funcţionarea în gol a motorului şi se închide circuitul de excitaţie, deschizîndu-se în acelaşi timp rezistenţa de descărcare; motorul va intra în sincronism;

— după intrarea în sincronism se va regla curentul de excitaţie astfel ca prin înfăşurarea statorului să treacă un curent minim şi apoi se roteşte maneta controlerului de la autotransformator, trecînd motorul la tensiune plină şi desfăcînd steaua autotransformatorului;

— se va regla curentul de excitaţie corespunzător cu sarcina şi cu factorul de putere prevăzut de datele tehnice ale motorului.

Compensatoarele sincrone care au nevoie de un cuplu mic la pornire pot fi pornite şi prin reactor (fig. 4.49). Închiderea întreruptorului principal I_1 se face numai după ce s-a verificat în prealabil dacă întreruptoarele I_2 şi I_3 sînt deschise. După ce se atinge turaţia maximă se închid I_2 şi I_3, scurtcircuitînd reactorul şi rezistenţa de descărcare.

Oprirea motorului sincron se efectuează astfel:

— se scoate sarcina de pe motor;

— se reglează excitaţia astfel ca să avem în stator curentul minim;

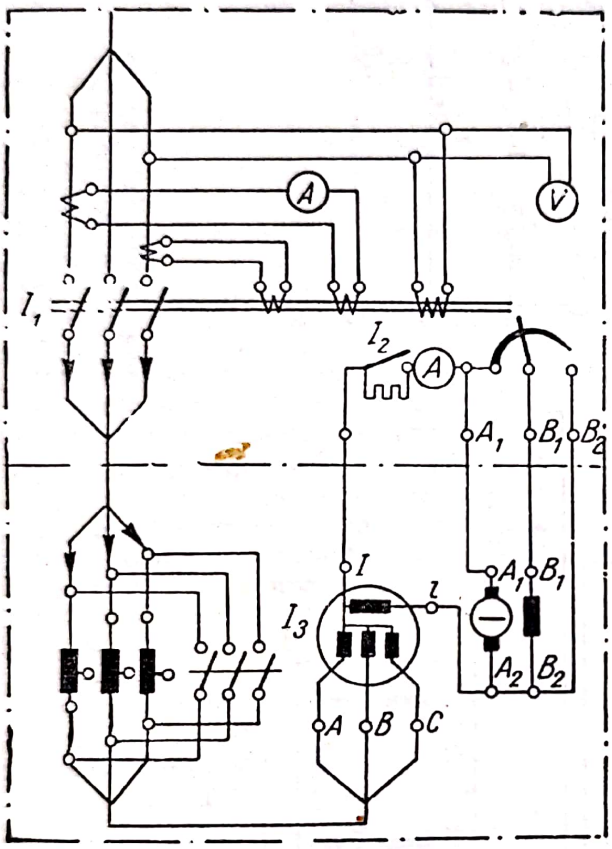
— se deschide întreruptorul principal;

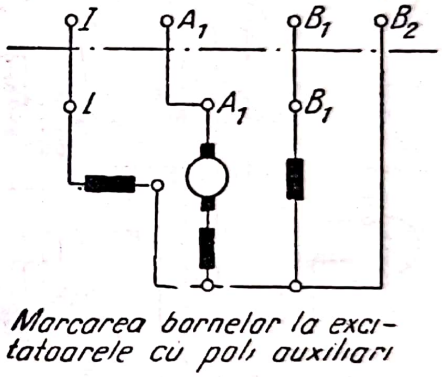
— se aduce controlerul autotransformatorului în poziţia de pornire, respectiv se deschid I_2 şi I_3.

Scanned with OKEN Scanner

În cazul concret al motoarelor din seria MSI, s-a realizat la uzinele Electroputere Craiova un tablou de comandă automată tip TSA.

Aceste tablouri permit pornirea și sincronizarea motoarelor atît în gol, cît și la sarcină sporită, pînă la 0,4—0,5 M_n (cazul pornirii cu compresorul în gol).





Marcarea bornelor la excitatoarele cu poli auxiliari

Fig. 4.49. Pornirea compensatoarelor sincrone prin reactor.

Pornirea motoarelor se face în acest caz cu autotransformator de pornire, sincronizarea făcîndu-se însă numai după aplicarea la bornele motorului a tensiunii nominale.

Schema de pornire a tabloului de comandă automată este reprezentată în fig. 4.50.

În alcătuirea schemei s-a ținut seamă de protecția electromotoarelor împotriva suprasarcinilor prin relee termice și maximale precum și împotriva pornirii prelungite, prin contacte de blocaj corespunzătoare.

Alimentarea și întreruperea circuitului principal al motorului se face printr-un întreruptor automat de tip DITA-350 EM (I_1) cu acționare electromagnetică.

Reducerea tensiunii aplicate electromotorului sincron, în faza de pornire, se face printr-un autotransformator de pornire de tip TPC-3?0 (pentru 100 kW) sau TPC-650 (pentru 200 kW) cu raport 0,64 care reprezintă o variantă a tipurilor normale TPS-320 sau TPS-650 prin eliminarea controlerului.

Scanned with OKEN Scanner

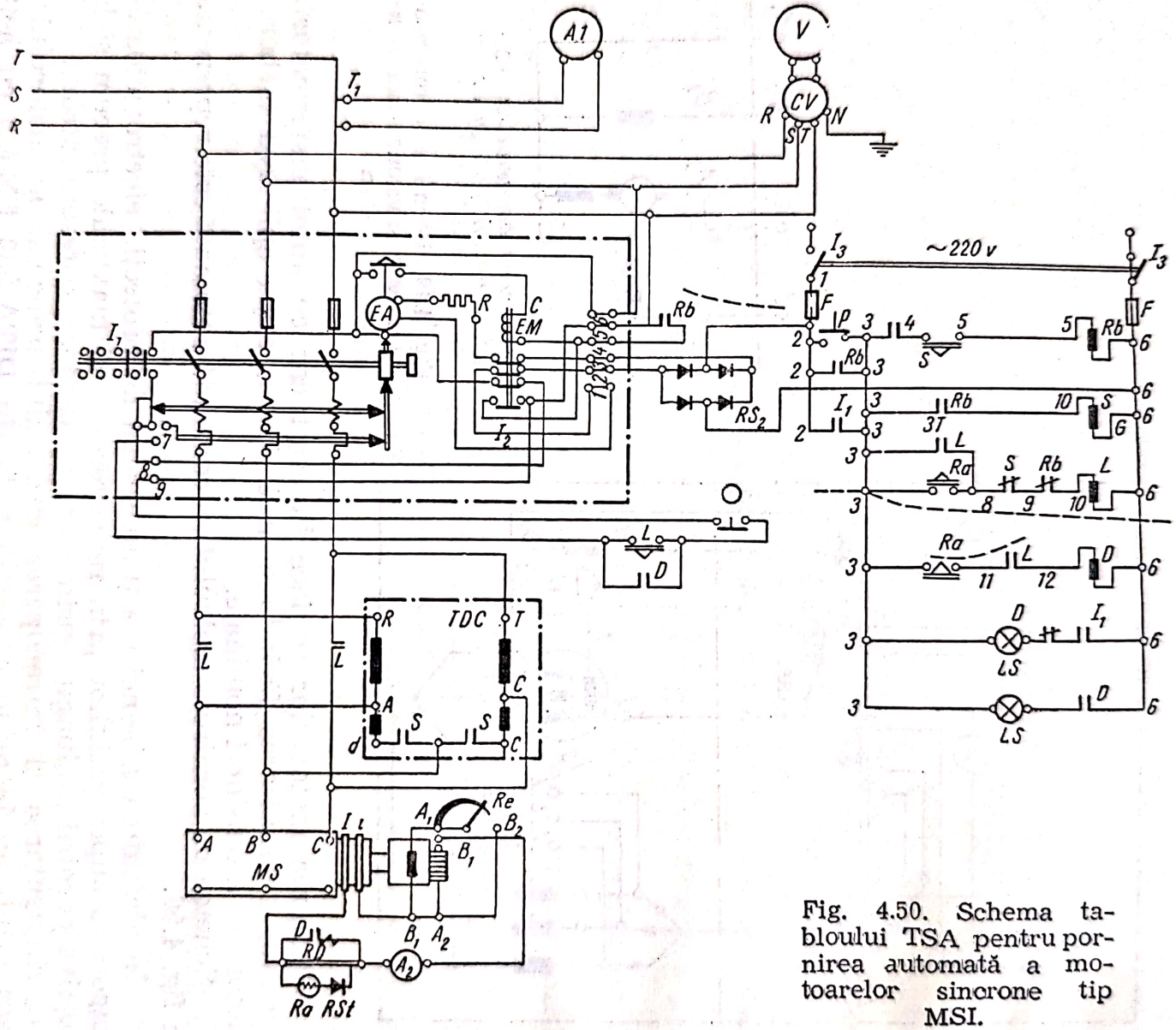


Fig. 4.50. Schema tabloului TSA pentru pornirea automată a motoarelor sincrone tip MSI.

Comutația autotransformatorului de la tensiune redusă la tensiune plină se face prin contactoare în aer de 200 A (*S*) și 400 A (*L*) la 500 V.

Pentru comanda intrării în sincronism se folosește un releu electromagnetic temporizat cu spiră în scurtcircuit (*Ra*).

Funcționarea schemei din fig. 4.50 se desfășoară după cum urmează:

Faza 1 — conectarea la rețea a motorului. Prin apăsarea pe butonul de pornire *P* se alimentează bobina releului intermediar *Rb*. Un contact al acestuia alimentează electromagnetul *EM* care închide întreruptorul I_2, iar acesta alimentează electromagnetul de acționare al întreruptorului *EA*, care efectuează conectarea la rețea. Un alt contact al releului *Rb* comandă închiderea contactorului *S*; motorul, alimentat cu tensiune redusă, începe să se rotească. În acest timp este alimentat prin impulsuri de curent și releul temporizat *Ra* care începe să funcționeze. Impulsurile sînt date cu ajutorul redresorului *RS-1* înseriat cu bobina releului *Ra*.

Faza 2 — trecerea la tensiune plină. Odată cu alimentarea contactorului *S* în faza 1, a intrat în funcțiune și contactorul temporizat independent *S*, înseriat cu bobina releului *Rb*. După terminarea temporizării, necesară pentru ca motorul să ajungă la turația maximă corespunzătoare, contactorul *S* întrerupe circuitul releului *Rb*. Prin această întrerupere își pierde alimentarea contactorul *S* și primește alimentare contactorul *L*, care conectează motorul la tensiunea plină. Odată cu închiderea contactorului *L* se pregătește alimentarea contactorului *D*, care urmează să scurtcircuiteze rezistența de descărcare *RD*.

Faza 3 — sincronizarea motorului. Cînd motorul a ajuns la 95% din turația sincronă, impulsurile de curent mici fac ca releul *Ra* să-și piardă practic alimentarea. Din acest moment intră în funcțiune contactele temporizate independente *Ra* înseriate cu bobinele contactoarelor *D* și *L*. După terminarea temporizării, contactul *Ra* înseriat cu bobina contactorului *D* se închide, iar cel înseriat cu bobina contactorului *L* se deschide. În acest timp primește alimentare contactorul *D* care scurtcircuitează rezistența de descărcare producînd astfel sincronizarea motorului. Contactorul *L* rămîne în continuare alimentat prin contactul propriu *L* pus în paralel cu contactul temporizat *Ra* din circuitul său de alimentare.

Din acest moment se trece la reglarea manuală a curentului de excitație al motorului, în funcție de sarcina sa nominală. Reglarea se face cu ajutorul reostatului de excitație *Re* în circuitul de excitație al excitatoarei.

Oprirea motorului se face apăsînd pe butonul *0*, care produce declanșarea întreruptorului principal I_1.

Schema principală a unui alt sistem automatizat de pornire, a fost expusă la paragraful 4.4.2. odată cu sistemul de excitație cu tiristoare.

4.7. ÎNTREȚINEREA MAȘINII SINCRONE ÎN TIMPUL EXPLOATĂRII

Pentru asigurarea unei durate de viață cît mai lungi și pentru a evita avarii grave ce pot duce la scoaterea din servici a mașinii sincrone, trebuie ca în timpul exploatării să se asigure o întreținere corespunzătoare [74, 76].

Întreținerea se realizează după un anumit program, și anume:

— la un interval de timp care depinde de condițiile de lucru, mașinile trebuie revizuite și curățate de praf cu aer comprimat;

— trebuie revizuite portperiile, inelele și colectorul; orice arsuri vor fi înlăturate;

Scanned with OKEN Scanner

— la fiecare revizuire trebuie verificată mărimea întrefierului, starea strîngerii tuturor fixărilor prin şuruburi, mai ales la părţile rotative şi izolate;

— trebuie verificată rezistenţa izolaţiei;

— se verifică temperaturile diferitelor părţi ale maşinii în timpul funcţionării în sarcină.

Cu ocazia reparaţiei mijlocii şi capitale, maşina sincronă trebuie demontată. Demontarea şi montarea maşinilor trebuie încredinţată specialiştilor.

Ordinea în care se face demontarea este următoarea:

demontarea excitatoarei;

— se desfac şuruburile capacului excitatoarei şi se scoate capacul;

— se scot periile şi se aşază în poziţie orizontală pe portperii sub arc;

— se desfac şuruburile de prindere a carcasei excitatoarei de scutul generatorului şi se scoate statorul;

— se învîrte dispozitivul de extragere a bucşei rotor de pe ax şi se scoate rotorul;

demontarea generatorului sau motorului:

— se desfac şuruburile de prindere a scutului de carcasă şi şuruburile de prindere a căpăcelului de scut şi se scot scuturile;

— se scoate rotorul cu rulment, portperiile şi căpăcelele interioare, săltînd uşor din macara, după ce în prealabil s-au desfăcut cablurile care vin de la portperii şi cutia de borne.

4.8. DEFECTE ŞI REGIMURI ANORMALE DE FUNCŢIONARE

4.8.1. **Generalităţi**

Defecte şi situaţii anormale de funcţionare ale maşinilor sincrone sînt numeroase.

În cele ce urmează se enumeră cele mai întîlnite defecte:

— supraîncălzirea fierului activ al statorului;

— supraîncălzirea înfăşurării statorului;

— supraîncălzirea înfăşurării de excitaţie;

— scîntei la perii;

— lipsa tensiunilor la bornele maşinii sincrone funcţionînd în gol ca generator;

— la funcţionarea în gol a generatorului sincron, există tensiune numai între două faze;

— la funcţionarea în gol a generatorului, tensiunile între faze sînt mai mici decît cele prescrise de constructor;

— la funcţionarea în gol a generatorului, tensiunile între faze sînt inegale;

— tensiunea generatorului variază atît la funcţionarea în gol cît şi în sarcină;

Scanned with OKEN Scanner

— regimuri anormale la funcționarea în paralel;
— motorul sincron nu pornește (sau pornește dar nu ajunge la turația normală);
— motorul sincron pendulează sau iese din sincronism;
În cele ce urmează se vor trata numai defectele specifice mașinilor sincrone.

4.8.2. Regimuri anormale și defecte la funcționarea în paralel a generatorului

Funcționarea în paralel a generatorului este instabilă, intensitatea curentului și puterea oscilează. Oscilația poate fi atît de mare, încît generatorul iese din sincronism.

Simptomele ieșirii din sincronism sînt: curentul în stator și puterea oscilează brusc, șocurile lor depășind cu mult valorile normale, ajung pînă la limitele scalelor aparatelor; tensiunea generatorului și a barelor oscilează brusc, fiind mai mică decît cea normală; curentul rotorului oscilează intens în jurul valorii nominale; generatoarele de obicei au un bîziit care este în rezonanță cu oscilațiile aparatelor.

Dintre cauzele unui asemenea regim anormal citățm:

Regulatorul motorului primar este defect; există prea mare neuniformitate a motoarelor primare (motoare cu ardere internă) care acționează diversele generatoare (în special cînd lipsesc înfășurările de amortizare în piesele polare ale rotorului).

Se vor repara regulatoarele motoarelor primare; se vor conecta bobine de reactanță (reactoare) între generatoare și barele colectoare. Se va consulta uzina producătoare.

Rețeaua complexă în care funcționează generatorul și-a pierdut stabilitatea dinamică. Cauza poate fi conectarea sau deconectarea din rețea a unuia sau a cîtorva generatoare sau consumatori mari; schimbarea schemei de conexiuni (configurației) a rețelei; avarii în rețea (în special scurtcircuite).

Măsurile menite să redea stabilitatea rețelei sînt următoarele: deconectarea rapidă a scurtcircuitelor, forțarea excitației la scurtcircuite, folosirea dispozitivelor de reanclanșare automată rapidă a liniilor de transport lungi etc.

În legătură cu aceasta, deoarece modul cum trebuie să acționeze personalul în cazul oscilațiilor depinde de o serie întreagă de condiții, este necesar să se întocmească instrucțiuni cu valabilitate locală pentru combaterea oscilațiilor. Aceste instrucțiuni trebuie să existe la centralele electrice.

Generatorul și-a pierdut excitația.

Regimul de funcționare a generatorului s-a schimbat: curentul de excitație, din rotor, este aproape zero, tensiunea la barele generatorului este scăzută, puterea indicată de wattmetru este mai mică decît cea normală, curentul statorului este mare, indicatorul fazmetrului trece în zona

Scanned with OKEN Scanner

capacitivă, iar wattmetrul de putere reactivă arată că generatorul consumă putere reactivă. Generatorul a intrat în regim asincron de funcționare.

În conformitate cu instrucțiunile în vigoare se admite funcționarea turbogeneratoarelor în regim asincron, fără excitație, timp de 30 minute. Nu este permisă funcționarea în acest regim a turbogeneratoarelor care au rotoare prevăzute cu bandaje din sîrmă sau cu dinți montați. Valoarea admisibilă a sarcinii în regim asincron se stabilește prin încercări.

În ceea ce privește hidrogeneratoarele, nu se permite funcționarea lor în regim asincron, fie că posedă sau nu înfășurare de amortizare. Din acest motiv, dacă nu se reușește restabilirea rapidă a excitației, generatoarele trebuie deconectate de la rețea.

Generatorul funcționează în regim de motor.

Simptomele sînt următoarele: se schimbă sensul energiei active (wattmetrul indică în sens invers), puterea reactivă absorbită de regulă crește, curentul statorului are o valoare ceva mai mică, iar tensiunea statorului, curentul și tensiunea de excitație rămîn neschimbate. Cauza acestui regim anormal este un defect al regulatorului motorului, (oprirea admisiei vaporilor, a combustibilului sau a apei).

Se va repara regulatorul.

Generatorul poate lucra în regim de motor timp nelimitat; durata de funcționare în acest regim este limitată numai de condițiile de funcționare ale motorului primar.

Cu toate că excitația este bine reglată, între generatoarele care funcționează în paralel au apărut curenți de egalizare. La generatoarele care funcționează în paralel și au neutrul scos în exterior, pot apare curenți de egalizare și prin conductorul neutru.

Forma curbelor tensiunilor electromotoare a diverselor generatoare diferă foarte mult.

Se vor conecta bobine de reactanță (reactoare) între generatoare și barele colectoare. La măsurarea curenților de egalizare se va avea în vedere frecvența lor ridicată și pentru aceasta se vor utiliza numai aparate ale căror indicații nu depind de frecvență (cele mai potrivite sînt aparatele termice).

4.8.3. Defecte la pornirea în asincron a motorului sincron

Motorul nu pornește, sau pornește, însă nu ajunge la turația normală; intensitatea curentului în toate trei fazele este aceeași. Cauza poate fi tensiunea de pornire mică din cauza scăderii tensiunii rețelei, sau conectarea greșită a motorului cu autotransformatorul de pornire din cauza alegerii greșite a bobinei de reactanță (reactorului).

Se va măsura tensiunea rețelei la bornele primare ale autotransformatorului sau reactorului; dacă tensiunea este cu 10—15% mai mică decît cea minimă admisibilă, atunci cauza poate fi aceasta. Este necesar să se mărească tensiunea rețelei pînă la valoarea ei nominală. Dacă aceasta nu este posibil sau dacă tensiunea rețelei este normală, pentru creșterea

Scanned with OKEN Scanner

tensiunii de pornire a motorului este necesar ca motorul să fie conectat la treapta următoare a tensiunii secundare a autotransformatorului. Dacă autotransformatorul de pornire are mai multe prize în înfăşurarea primară, prin conectarea corespunzătoare la reţea a înfăşurării primare se poate de asemenea ridica tensiunea lui secundară (tensiunea de pornire).

Dacă pornirea se efectuează printr-o bobină de reactanţă cu miez de oţel (bobină de şoc), creşterea tensiunii de pornire se obţine prin micşorarea reactanţei bobinei; aceasta se realizează prin mărirea întrefierului dintre jumătăţile superioară şi inferioară a oţelului activ. Dacă mărirea întrefierului nu este posibilă, trebuie micşorat numărul de spire al bobinei.

Sarcina la pornire este prea mare. Se va reduce sarcina la pornire.

La pornirea prin autotransformator, motorul primeşte excitaţie cînd la bornele statorului tensiunea este mai mică decît cea nominală. Din această cauză motorul nu poate dezvolta aşa-numitul cuplu subsincron (cuplu la care turaţia motorului atinge 95% din cea nominală), care este necesar pentru intrarea motorului în sincronism.

Se va modifica schema de pornire a motorului, astfel ca tensiunea de excitaţie să se aplice în moentul în care tensiunea la bornele statorului are valoarea nominală.

Trebuie menţionat că prin pornirea directă la reţea a motorului sincron fără nici un fel de mijloace de pornire (autotransformator, reactor), se pot asigura acestuia condiţii mai bune de pornire. Printr-o asemenea pornire, se realizează o importantă simplificare a schemei de pornire; după cum rezultă din practică, în acest caz înfăşurarea de pornire a rotorului se încălzeşte mai puţin decît în cazul pornirii la o tensiune redusă. Prin pornirea directă, se simplifică mult exploatarea motorului, fără ca aceasta să reducă siguranţa lui în funcţionare. De aceea, dacă motorul porneşte greu, trebuie să se treacă la pornirea directă. Pentru majoritatea motoarelor alimentate de la o reţea suficient de puternică, o asemenea pornire este pe deplin admisibilă şi nu constituie nici un fel de pericol. În unele cazuri, pentru pornirea directă trebuie întărite în mod suplimentar părţile frontale ale înfăşurării statorului. Pornirea directă poate fi inadmisibilă sau de nedorit numai pentru un număr limitat de cazuri (de exemplu, pentru motoarele de foarte mare putere, cum sînt compensatoarele).

În problema pornirii motorului trebuie consultată uzina producătoare.

Există o atingere între spire în unele bobine ale înfăşurării de excitaţie.

Se observă aceleaşi fenomene ca în cazul precedent, însă în rotor se ivesc uneori flăcări sau scîntei.

Există un contact imperfect în înfăşurarea de pornire (amortizare) în locurile de îmbinare a barelor cu inelele de scurtcircuitare (inelele de conexiune) sau în punţile de legătură a segmentelor care compun inelele de scurtcircuitare.

Se vor verifica toate contactele înfăşurării de pornire. Barele care au contacte slabe cu inelele se vor lipi cu aliaj tare; la verificare, toate

Scanned with OKEN Scanner

locurile de îmbinare ale segmentelor inelelor de scurtcircuitare se vor desface, deoarece este posibil ca suprafețele de contact să fie oxidate și aceasta nu se poate observa prin simpla examinare exterioară. Suprafețele de contact se vor curăți cu atenție, la nevoie se vor ajusta.

4.8.4. Motorul sincron pendulează și iese din sincronism

În timpul funcționării motorului apar pendulații (oscilații) ale rotorului, care provoacă oscilația acelor indicatoare ale ampermetrului și wattmetrului conectate în circuitul statorului. În motor nu se găsește nici un defect. Pendulațiile pot fi atît de puternice, încît să provoace ieșirea motorului din sincronism. Cauze pot fi următoarele:

Sarcina variază prea repede; se va mări curentul de excitație al motorului. În multe cazuri această măsură reduce mult oscilațiile.

Oscilațiile sînt cauzate de mecanismele acționate, de exemplu, de compresoarele cu piston, pompe etc.

Tensiunea și frecvența rețelei oscilează puternic; există șocuri dinamice cauzate de scurtcircuite în rețeaua de alimentare sau, în cazul grupului motor-generator, de scurtcircuite în rețeaua generatorului. Se va trece la forțarea excitației (atingerea excitației maxime admisibile), care mărește stabilitatea funcționării motorului, în cazul proceselor tranzitorii.

În același scop pot fi utilizate sisteme automate de reglare a excitației.

Motorul iese din sincronism; nu se observă oscilații; drept cauze pot fi: motorul este supraîncărcat. Se va reduce sarcina.

Au avut loc deranjamente (de exemplu, un scurtcircuit) în rețeaua care alimentează rotorul motorului (în cazul excitației de la o rețea de curent continuu, independentă).

Cu ajutorul megohmmetrului se va găsi locul scurtcircuitului sau întreruperii și se va înlătura defectul.

Scanned with OKEN Scanner

5. MAŞINA de curent continuu

5.1. ALEGEREA UNEI MAŞINI DE CURENT CONTINUU ÎN FUNCŢIE DE CONDIŢIILE DE EXPLOATARE

5.1.1. Generalităţi

STAS 4861-55 stabileşte ca maşini de curent continuu uzuale următoarele categorii de maşini:

generatoare de curent continuu: generatorul de curent continuu cu autoexcitaţie; generatorul de curent continuu cu excitaţie în serie; generatorul de curent continuu cu excitaţia în derivaţie; generatorul de curent continuu cu excitaţia separată; generatorul de curent continuu cu excitaţia compusă sau mixtă (adiţională); survoltorul (maşină de curent continuu cu excitaţia în derivaţie sau separată, legată în serie cu tensiunea reţelei şi servind la majorarea tensiunii reţelei);

motoare de curent continuu: motorul de curent continuu cu excitaţia în serie; motorul de curent continuu cu excitaţia derivaţie; motorul de curent continuu cu excitaţia separată; motorul de curent continuu cu excitaţia compusă (sau mixtă) adiţională; motorul de curent continuu cu excitaţia compusă (sau mixtă) diferenţială; devoltorul (maşină de curent continuu cu excitaţie în derivaţie sau separată, cu indusul legat în serie cu reţeaua şi servind la scăderea tensiunii acesteia).

Se consideră maşini speciale de curent continuu următoarele categorii de maşini:

— *maşini cu cîmp transversal:* generatorul pentru iluminatul trenurilor (generator Rosenberg); generatorul pentru sudură electrică; metadina; amplidina;

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 5.1

Puteri tipizate ale motoarelor de curent continuu

Puterea în kW	Puterea în CP	Puterea în kW	Puterea în CP
0,125	0,17	15	20
0,2	0,27	22	30
0,33	0,45	30	40
0,5	0,7	40	55
0,8	1,1	50	68
1,1	1,5	64	87
1,5	2	80	110
2,2	3	100	136
3	4	125	170
4	5,5	160	217
5,5	7,5	200	271
7,5	10	250	339
11	15		

— *mașini cu excitații multiple:* mașinile de amplificare cu autoexcitație; generatorul cu două excitații pentru curent constant (pentru sudură);

— *generatoare cu trei perii:* generatoare cu trei perii pentru autovehicule; generatoare cu trei perii pentru sudură;

— *mașina de curent continuu cu divizor de tensiune* pentru distribuția cu trei fire;

— *mașina unipolară.*

În cele ce urmează se vor expune cîteva probleme privind alegerea mașinilor de curent continuu în funcție de condițiile de exploatare.

5.1.2 Motoare de curent continuu uzuale

Deși nu există standarde care să restrîngă tipurile constructive, puterile și tensiunile nominale ale motoarelor de curent continuu, diverși constructori de mașini de curent continuu au convenit în vederea tipizării tensiunilor nominale de serviciu, a turațiilor și puterilor nominale ale acestor mașini.

Astfel s-a convenit ca tensiunile nominale de serviciu să fie 110, 220 și 440 V. A existat de asemenea o convenție stabilită între unele firme constructoare ca puterile nominale utile la tensiunile nominale mai sus arătate să fie cele din tabelul 5.1.

Din acest tabel se observă că pînă la 40 kW fiecare putere este aproximativ egală cu cea precedentă înmulțită cu 1,36. De la 40 kW în sus, raportul amintit este numai de 1,25 spre a nu se obține diferențe prea mari între puterile tipurilor succesive. Preocupări au fost și pentru tipizarea turațiilor nominale de serviciu, căutîndu-se ca acestea să urmeze

Scanned with OKEN Scanner

gama de turații sincrone ce se pot realiza la motoarele sincrone, în rețelele de curent alternativ cu frecvențe de 50 Hz.

Turațiile sincrone adaptate și pentru motoarele de curent continuu sînt: 3 000; 1 500; 1 000; 750; 600; 500 rot/min.

Deoarece salturile de la 3 000 la 1 500 rot/min și de la 1 500 la 1 000 rot/min sînt prea mari s-au mai înserat turațiile de 2 000 rot/min pentru motoarele pînă la 11 kW și 1 200 rot/min de la 14 pînă la 100 kW. Se obțin astfel turațiile nominale din tabelul 5.2.

Tabelul 5.2

Turațiile nominale ale unor motoare de curent continuu

Turația nominală rot/min	3000	2500	2000	1500	1200	1000	750	600	500	ș.a.m.d.

O caracteristică importantă a motoarelor de curent continuu constă în aceea că turația de serviciu poate crește cu aproximativ 15% prin slăbirea excitației fără ca puterea să se schimbe. O altă categorie de motoare de curent continuu este aceea a motoarelor cu turație reglabilă.

Cu mulți ani în urmă s-au construit motoare cu turație reglabilă conform tabelului 5.3 și care au corespuns nivelului respectiv al tehnicii.

Aceste motoare se mai întîlnesc și azi în diverse exploatări și acționări și considerăm util a le prezenta.

La aceste motoare raportul dintre turația minimă și maximă a intervalului de reglare, numit mai scurt interval de reglare este tipizat conform înțelegerii între unele firme constructoare la 1/1,5; 1/2; 1/3; 1/5.

Toate aceste motoare s-au construit reversibile, fără deplasarea periilor pe colector, spre a se putea adapta nevoilor variate pentru care au fost destinate.

Motoarele cu turație variabilă descrise înainte, au fost executate cu excitația în derivație, practic în mod similar cu cele cu turații invariabile.

Acestea se execută uneori cu înfășurări auxiliare pentru evitarea pendulării sau ambalării.

O altă categorie de motoare pentru curent continuu care s-au executat au fost acelea pentru macarale.

Acestea sînt motoare de construcție închisă, protejate împotriva prafului grosier și a intrării în ele a apei de picurare și de ploaie.

Puterile și tensiunile convenite a se difuza, sînt aceleași ca pentru motoarele considerate normale.

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 5.3

Datele tipizate ale unor motoare de curent continuu cu turație reglabilă

Mărimea	Reglarea 1 : 1,5				Reglarea 1 : 2				Reglarea 1 : 3			
	Puterea		n rot/min	η%	Puterea		n rot/min	η%	Puterea		n rot/min	η%
	kW	CP			kW	CP			kW	CP		
9	1,1	1,5	670...1000	71	1,1	1,5	670...1340	71	1,1	1,5	670...2010	71
	1,8	2,5	940...1410	75	1,8	2,5	940...1880	75				
	3	4	1420...2130	80								
10	1,5	2	675...1010	74	1,5	2	675...1350	74	1,5	2	675...2025	74
	2,4	3,3	940...1410	77	2,4	3,3	940...1880	77				
	4	5,5	1430...2145	81								
11	2	2,7	675...1010	76	2	2,7	675...1350	76	2	2,7	675...2025	76
	3,3	4,5	650...1425	78	3,3	4,5	950...1900	78				
	5,5	7,5	1430...2145	82								
12	3	4	680...1020	78	3	4	680...1360	78	3	4	680...2010	78
	4,5	6	950...1425	70,5	4,5	6	950...1900	79,5				
	7,5	10	1440...2160	83								
13	4,5	6	685...1030	79	4,5	6	685...1370	79	4,5	6	685...2055	79
	7	9,5	950...1425	81,5	7	9,5	950...1900	81,5				
	11	15	1440...2160	84								
14	4,5	6	460... 690	75,5	4,5	6	460... 920	75,5	4,5	6	460...1380	75,5
	6	8	550... 825	78,5	8	8	555...1100	78,5	6	8	550...1650	78,5
	7,5	10	700...1050	81	7,5	10	700...1400	81				
	11	15	950...1425	83								
	14	19	1150...1725	84,5								
15	6	8	460... 690	77,5	6	8	460... 920	77,5	6	8	460...1380	77,5
	8,5	11,5	550... 825	80,5	8,5	11,5	550...1100	80,5	8,5	11,5	550...1650	80,5
	11	15	700...1050	82,5	11	15	700...1400	82,5				
	15	20	950...1425	84,5								
	20	27	1150...1725	86								
16	8,5	11,5	460... 690	79,5	8,5	11,5	460... 920	79,5	8,5	11,5	460...1380	79,5
	12	16	560... 840	82	12	16	560...1120	82	12	16	560...1680	82
	15	20	710...1055	84	15	20	710...1420	84				
	22	30	960...1440	86								
	26	35	1160...1740	87								
17	12	16	465... 705	81	12	16	460... 920	81	12	16	465...1395	81
	16	21,5	560... 840	83,5	16	21,5	560...1120	83,5				
	22	30	710...1065	85,5	22	30	710...1420	85,5				
	30	40	900...1440	87								

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 5.3 (continuare)

Mărimea	Reglarea 1 : 1,5				Reglarea 1 : 2				Reglarea 1 : 3			
	Puterea		n rot/min	η%	Puterea		n rot/min	η%	Puterea		n rot/min	η%
	kW	CP			kW	CP			kW	CP		
18	17	23	470... 705	82,5	17	23	470... 940	82,5	17	23	470...1410	82,5
	22	30	565... 850	85	22	30	565...1130	85				
	33	40	715...1070	86,5	30	40	715...1430	86,5				
	40	55	965...1450	88								
1	15	20	350... 525	79	15	20	350... 700	79	15	20	350...1050	79
	22	30	470... 705	83,5	22	30	470... 490	83,5				
	30	40	570... 855	86	30	40	570...1140	86				
	40	55	720...1080	87,5								
20	20	27	350... 525	80	20	27	350... 700	80	20	27	350...1050	80
	30	40	470... 705	85	20	40	470... 940	85				
	40	55	570... 855	87	40	55	570...1140	87				
	50	68	720...1080	88,5								
21	26	35	350... 525	81	26	35	350... 700	81	26	35	350...1050	81
	40	55	475... 710	86	40	55	475... 950	86				
	50	68	570... 855	88	50	68	570...1140	88				
	64	87	720...1080	89								
22	25	34	285...430	31	25	34	285...570	81	25	34	285...855	81
	40	68	475...710	87	50	68	475...950	87				
	64	87	575...860	88,5								
23	32	43	285...430	82	32	43	285...570	82	82	43	285...855	82
	64	87	475...710	87,5	64	87	475...950	87,5				
	80	100	575...860	89								

În tabelul 5.4 sînt prezentate date privind motoarele pentru macarale.

5.1.3. Motoare uzuale cu utilizări speciale

Mașina de curent continuu uzuală are în general un rol special în acționări și în general o utilizare specială. Dintre aceste utilizări ale mașinii de curent continuu se poate cita utilizarea în tracțiunea urbană (tramvaie, troleibuze), în transportul uzinal (electrocare și electrostivuitoare), în acționarea mașinilor unelte ca înlocuitor al cutiei de viteză (la strungurile automate), pentru autovehicule ca generator de curent, motor de pornire, motor pentru ștergătorul de parbriz, motor pentru aerotermă, și pentru acționării pe nave.

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 5.4

Datele tipizate ale unor motoare de curent continuu pentru macarale

Puterea nominală		Turaţia rot/min		
		normală la 440V	secundară	
kW	CP		maximă	minimă
0,8	1,1	1 420	—	—
1,1	1,5	1 420	—	1 000
1,5	2	1 420	—	1 000
2,2	3	1 420, 1000	—	1 000
3	4	1 000	1 420	730
4	5,5	1 000	1 420	730
5,5	7,5	1 000	1 420	730, 530
7,5	10	1 000, 730	1 420	510
11	15	730	1 000	480
15	20	700	950	440
22	30	615	830	400
30	40	550	740	380
40	55	515	685	360
50	68	490	640	340
64	87	465	600	330
80	100	440	565	—
100	136	420	540	—

Scanned with OKEN Scanner

În cele ce urmează se vor expune cîteva particularități ale motoarelor pentru nave și transporturi urbane.

Utilizarea mașinii de curent continuu pe nave; navele după raza și locul de activitate se clasifică în două grupe:

1 — nave pentru oceane și pentru ape din zona tropicală;

2 — restul navelor (de exemplu nave pentru apele mărilor din zona temperată, nave pentru servicii de coastă sau port, nave pentru lacuri, fluvii sau canale).

La alegerea sau comandarea unei mașini de curent continuu destinate a funcționa pe nave, trebuie să se țină seama că aceste mașini sînt destinate a funcționa în următoarele condiții de lucru:

— la toate mașinile instalate pe nave din grupa 1, în sala mașinilor sau pe punte, temperatura aerului de răcire poate atinge +50°C, iar temperatura apei de răcire +40°C;

— la toate mașinile instalate pe nave din grupa 2, temperatura aerului de răcire poate atinge +40°C, iar apa de răcire +25°C; aceleași temperaturi sînt valabile și pentru următoarele mașini instalate pe nave din grupa 1: motoare pentru mașini unelte; toate mașinile care nu sînt montate în sala mașinilor sau pe punte;

— mașinile electrice navale trebuie să prezinte siguranță de funcționare într-un mediu cu umiditate relativă a aerului de 95%±3%, la temperatura de 20°C±2°C, pentru mașinile de la grupa 1 și 40°C±2°C pentru mașinile de la grupa 2;

— mașinile electrice pentru nave trebuie să prezinte siguranță de funcționare în condițiile de vibrații de la locul de utilizare (condiții care trebuie cunoscute la alegerea sau la comandarea mașinii);

— mașinile electrice pentru nave nu trebuie să creeze oscilații perturbatoare ale radiorecepției, mai mari decît cele prevăzute în tabelul 5.5 (STAS 5700-64);

Tabelul 5.5

Nivele maxime admisibile ale tensiunilor perturbatoare

Sursa de perturbații radio	Frecvența, în MHz				
	de la 0,15 la 0,5	peste 0,5 la 2,5	peste 2,5 la 20	peste 20 la 150	peste 150 la 400
	Nivelul limită admisibil al tensiunilor perturbatoare în μV				
Mașinile electrice ale navelor și ale altor instalații plutitoare:					
— pentru nave cu corp metalic	1 000	500	200	1 000	1 000
— pentru nave cu corp nemetalic și compozite	250	100	50	50	50

Scanned with OKEN Scanner

— maşinile electrice pentru nave sînt supuse, odată cu nava, unor mişcări în cele trei direcţii ale spaţiului şi, ca urmare, normele prevăd că maşinile electrice navale să prezinte siguranţă de funcţionare în următoarele condiţii:

— unghi de bandă permanent (canarisire) pînă la 15° şi diferenţă de asietă permanentă (aprovare sau apupare) pînă la 10°;

— balans de ruliu pînă la 45° şi tangaj pînă la 10°.

Prin STAS 5700-64 se stabilesc condiţii speciale pentru maşini electrice rotative.

Pe navele moderne motorul de curent continuu este înlocuit în cele mai multe cazuri cu motorul asincron cu mai multe viteze.

Motoarele electrice de curent continuu pentru tracţiune urbană; aceste motoare sînt destinate pentru tracţiunea tramvaielor, metropolitanelor, troleibuzelor, vehiculelor de tracţiune electrică pentru căi ferate urbane La alegerea acestor motoare trebuie să se ţină seama de următoarele condiţii specifice de funcţionare în exploatare: tensiunea nominală U_n; tensiunea de serviciu.

Tensiunea de serviciu a motoarelor alimentate direct de la linia de contact, poate varia de la 400 V la 900 V la o tensiune nominală de contact de 750 V.

Pentru motoarele de tracţiune se stabilesc prin standarde două regimuri: regimul continuu notat cu R_c; regimul unionar notat de R_h.

Ambele regimuri R_c şi R_h sînt indicate pe plăcuţa de fabricaţie a motorului.

Regimul R_c este de fapt regimul nominal garantat de fabrica constructoare.

Regimul R_h al unei maşini este un regim care corespunde unei sarcini mai mari decît cea corespunzătoare regimului R_c, pe care maşina o poate suporta timp de o oră fără a depăşi limitele supratemperaturilor încălzirilor din tabelul 5.6.

Tabelul 5.6

Supratemperaturi maxime admisibile pentru maşini de curent continuu

Partea maşinii	Metode de măsurare	Clasa de izolaţie			
		E	B	F	H
Înfăşurarea rotorului	Variaţia de rezistenţă	105 grd	120 grd	140 grd	160 grd
Înfăşurarea statorului	Variaţia de rezistenţă	115 grd	130 grd	155 grd	180 grd
Colectorul	Termometru electric	105 grd	105 grd	105 grd	105 grd

Observaţie — Nu se face nici o corecţie la supratemperaturile măsurate dacă temperatura aerului de răcire este cuprinsă în timpul încercărilor, între +10°C şi +40°C. În afara acestor limite, corecţia care trebuie aplicată încălzirilor observate va fi determinată de comun acord între constructor şi beneficiar.

Scanned with OKEN Scanner

Regimul R_h se verifică practic pe bancul de probă, începînd cu mașina în stare rece, dar nu este garantat de fabrica constructoare.

Regimul uniorar R_h servește însă la alegerea motorului de tracțiune ca putere utilă, evitînd supradimensionări în cazul cînd vehiculele funcționează pe rampe scurte.

Pe lîngă solicitările importante la sdruncinături și vibrații, motorul de tracțiune este supus și unor intemperii și condiții dificile ca: stropiri cu apă, contact cu zăpada sau praful abundent.

În funcție de aceste condiții trebuie bine aleasă poziția, locul de montaj pe autovehicul și gradul de protecție a motorului de tracțiune.

5.1.4. Tendințe noi privind construcția motoarelor de curent continuu

Încă nu s-a realizat o standardizare a motoarelor și generatoarelor de curent continuu. Se tinde a se standardiza dimensiunile de montaj, tensiunea de serviciu și gama de turații, adoptînd aceleași valori normale ca și la mașinile asincrone la înălțimea capătului de ax și în majoritate pentru celelalte dimensiuni de montaj.

În continuare sînt prezentate aceste mărimi:

Pentru înălțimea capătului de ax față de talpă (H) se adoptă valorile (în milimetri): 100; 112; 132; 160; 200; 225; 250; 280; 315; 355; 400.

Pentru distanța B între găurile de prindere în direcția longitudinală se adoptă valorile (în milimetri): 125; 140; 160; 190; 240; 311; 368; 406; 476; 500; iar pentru distanța A între găurile de prindere în direcție transversală valorile (în milimetri): 140; 160; 216; 254; 279; 318; 356; 406; 457; 508; 560; 610.

Pentru distanța C de la umărul axului pînă la prima gaură din talpă, valorile în milimetri: 63; 70; 89; 108; 121; 133; 149; 168; 190; 216; 280; (identice cu cele de la motoarele asincrone după STAS și DIN)

Turațiile uzuale în prezent pînă la gabaritul $H=200$ mm inclusiv sînt: 1 000; 1 500; 2 000 și 3 000 rot/min, iar pentru gabaritele 225; 250; 280 și 315 turațiile nu mai respectă gama (1 000; 1 500; 2 000; 2 500; 3 000) diferind foarte mult în funcție de gabaritul motorului.

Pentru exemplificare în tabelul 5.7 și fig. 5.1 sînt redate caracteristicile motoarelor de curent continuu fabricate de firma EVAR — Italia.

Aceste motoare se construiesc obișnuit în execuție b_3; b_5 și V_1 protejate, închise cu autoventilație sau cu ventilație forțată:

Toate motoarele de curent continuu inclusiv cele care se livrează de firma EVAR pot fi utilizate și în acționări care necesită variație de viteză.

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 5.7

Motoare de curent continuu fabricate de firma EVAR—Italia

Tipul de gabarit	Dimensiuni						Puterea		Turația rot/min	η %	Curentul la tensiunea de 440 V A	Masa kg
	H	*A*	*B*	*C*	D	*E*	*CP*	kW				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
100 b	100	140	125	63	19	40	0,5 0,8 1,1 1,42 1,75	0,37 0,59 0,81 1,05 1,3	1 000 1 500 2 000 2 500 3 000	74 75 76,5 77,5 78		26
112 b	112	160	140	70	19	40	0,95 1,5 2,1 2,7 3,3	0,7 1,1 1,54 2 2,4	1 000 1 500 2 000 2 500 3 000	76 78 79 79,5 80		37
132 b	132	216	160	89	24	50	1,6 2,5 3,5 4,5 5,5	1,18 1,84 2,58 3,3 4	1 000 1 500 2 000 2 500 3 000	79 81 82 83 84		55
160 b	160	254	190	108	28	60	3,2 5 7 9 11	2,35 3,7 5,15 6,6 8,1	1 000 1 500 2 000 2 500 3 000	81 82,5 84 85 86		80
180 b	180	279	190	121	32	80	5,4 8,3 11,6 15 18,5	4 6,1 8,5 11 13,6	1 000 1 500 2 000 2 500 3 000	83,5 85 86 87 88	11 16,3 22,5 26 35	100

Scanned with OKEN Scanner

							5,4	6,9	1 000	86	18,3		
							14,5	10,6	1 500	87,5	27,5		
200 b	200	318	240	133	42	110	20	14,7	2 000	88,5	38	175	
							26	19,1	2 500	89,5	48,5		
							32	23,5	3 000	90	60		
							20	14,7	1 000	89	37		
							25	18,4	1 250	89	46,5		
							30	22	1 500	90	55		
225 b	225	356	240	149	48	110	34	25	1 670	90	62,5		
							40	29,4	1 880	90,5	73		
							45	33	2 150	90,5	82,5		
							50	37	2 500	91	92		
							60	44	3 000	91,5	108,5		
							40	22	1 140	86	47		
							34	25	1 190	86	57		
							40	29,4	1 340	87	76		
							45	33	1 520	88	84		
250 b	250	406	311	168	65	140	50	36,8	1 520	88	94		
							60	44,2	1 620	89	112		
							75	55	1 900	89	139		
							85	62,6	2 800	91	155		
							100	73,6	3 000	91	183		
							50	36,8		88	94		
							60	44,2	1 150	88	113		
							75	55	1 200	89	140		
							90	66,2	1 340	89	167		
280 b	280	457	368	190	70	140	100	73,6	1 530	90	184		
							120	88,2	2 300	90	211		
							150	110	2 400	91	273		
							180	132	2 680				
							50	36,8	740	87	95		
							50	44,2	775	87	115		
							75	55	875	87,5	141		
							90	66,2	1 030	88	169		
315 b	315	508	406	216	75	140	100	73,6	1 480	89	186		
							120	88,2	1 550	89	223		
							150	110	1 750	90	275		
							180	132	2 060	90	330		
355 b	355	560	476	280	85	170							
400 b	400	610	500	280	90	170							

Scanned with OKEN Scanner

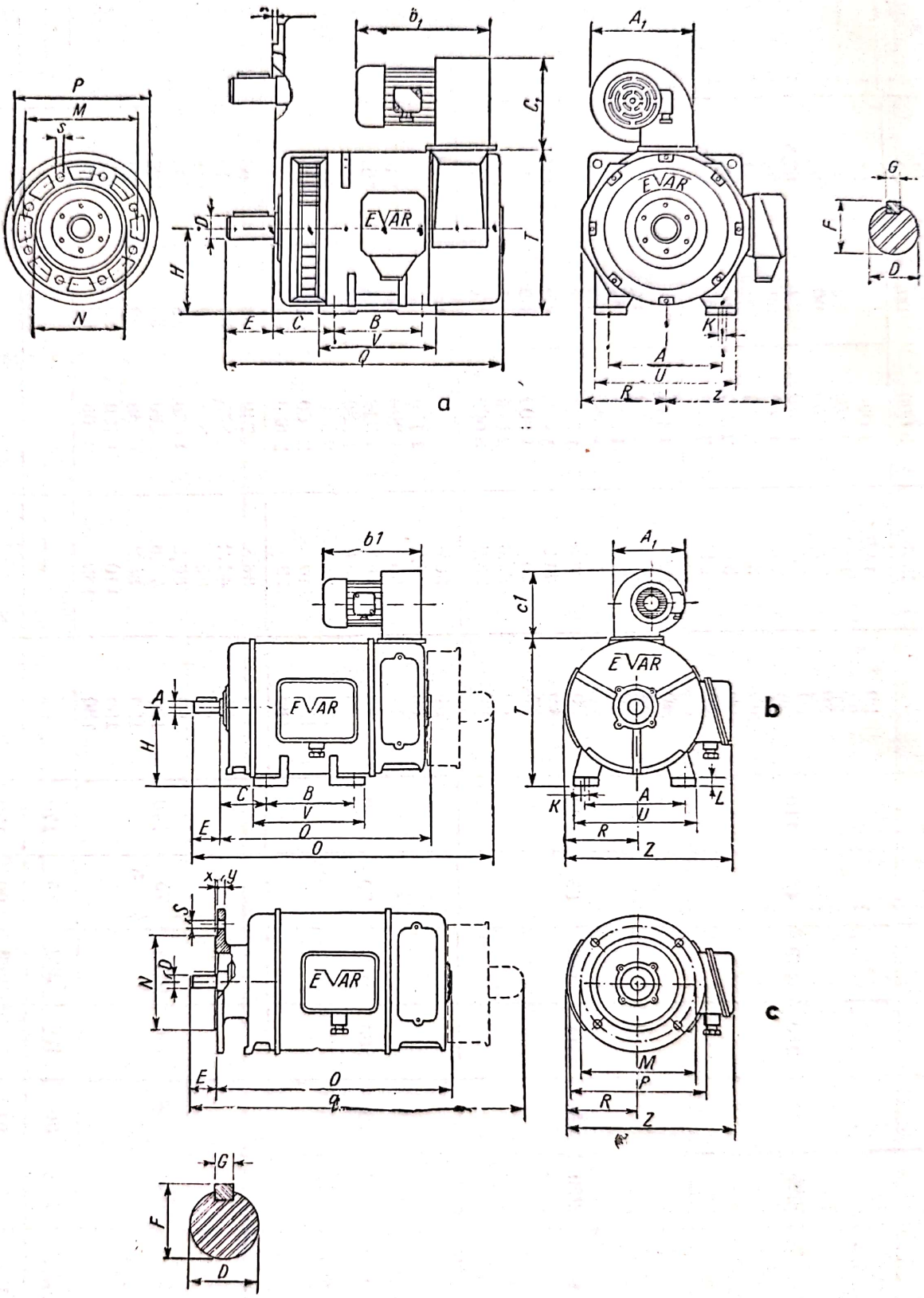


Fig. 5.1. Motoare de curent continuu de fabricaţie EVAR-Italia:
a—b — cu ventilaţie forţată; c — cu fixare prin flanşă.

Scanned with OKEN Scanner

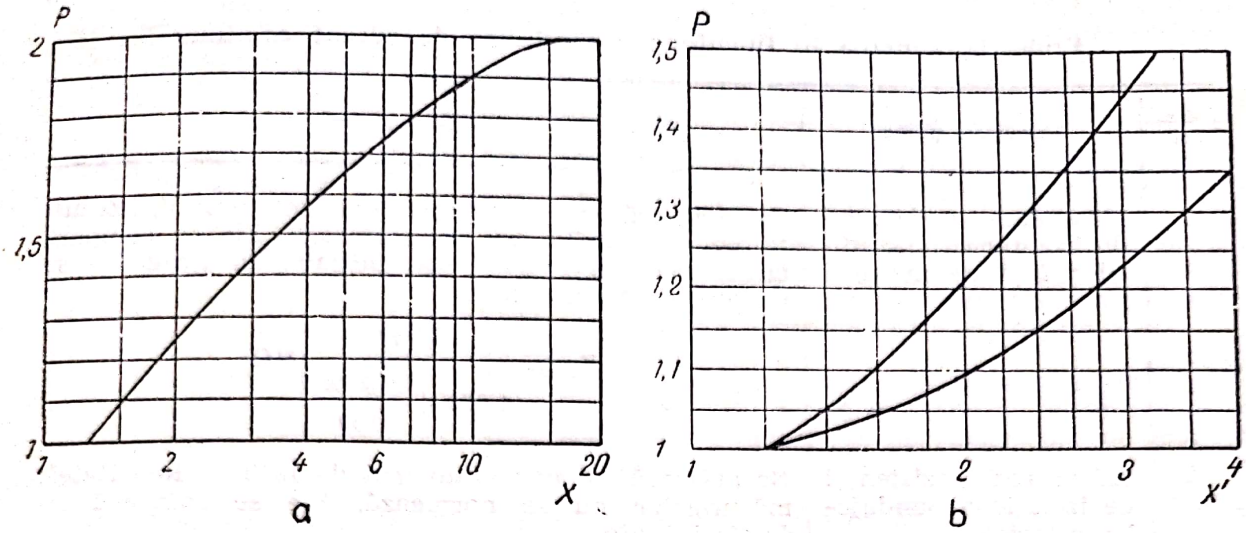


Fig. 5.2. Variația puterii motoarelor din tabelul 5.7, în cazul utilizării cu viteză variabilă:
a — la cuplu constant, cu variația tensiunii; *b* — la cuplu constant, cu slăbirea excitației.

În fig. 5.2 este prezentată variația puterii înscrise în tabelul 5.7 în funcție de reglarea turației.

5.2. PUNEREA ÎN FUNCȚIUNE A MAȘINILOR DE CURENT CONTINUU

Mașinile electrice de curent continuu sînt ambalate și expediate de fabrica constructoare.

La depozitare și apoi la montarea mașinilor de curent continuu la locul de exploatare se iau măsurile similare cu cele expuse în cadrul capitolului 3.

Înainte de punerea în funcție și legarea la rețea, mașinile de curent continuu se supun probelor preliminare conform tabelului 5.8.

La mașinile noi, precum și la mașinile care nu au funcționat timp îndelungat, este necesară operația de uscare înainte de punerea în funcțiune.

Criteriul pentru aprecierea necesității uscării este valoarea rezistenței de izolație și coeficientul de absorbție $k = \frac{R_{60}}{R_{15}}$. Cînd $k \geqslant 1{,}5$ mașina trebuie uscată.

Uscarea mașinii de curent continuu se face în mod similar cu uscarea celorlalte mașini electrice, expusă în capitolele anterioare, respectînd aceleași reguli pentru realizarea unei bune uscări.

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 5.3

Probe la punerea în funcţiune a maşinilor de curent continuu

Nr. crt.	Denumirea probei	Condiţiile probei
1	Măsurarea rezistenţei de izolaţie a înfăşurărilor faţă de masă şi între înfăşurări	Se măsoară cu megohmmetrul de 1000 V. Rezultatele măsurărilor nu se normează. Ele se compară cu datele din fabrică sau iniţiale. În lipsa lor se recomandă formula: $$R_{iz} \geqslant \frac{U_{(V)}}{1\,000 + \frac{P_{(kVA)}}{100}} \text{ (M}\Omega\text{)}$$
2	Măsurarea rezistenţei de izolaţie a bandajelor rotorice	Se măsoară cu megohmmetrul de 1000 V. Rezultatele măsurărilor nu se normează. Ele se compară cu datele iniţiale.
3	Încercarea izolaţiei înfăşurărilor cu tensiune alternativă mărită (50 Hz)	Se execută la maşini cu tensiuni nominală $U_{nom} > 36$ V şi puteri nominale $P_{nom} > 3$ kV.
4	Încercarea izolaţiei între spire la generatoarele de curent continuu	Valoarea tensiunii de încercare este de 1,3 U_{nom}, cu observaţia că în cazul maşinilor cu 4 sau mai mulţi poli tensiunea între două lamele vecine ale colectorului nu trebuie să depăşească 24 V. Durata menţinerii tensiunii de încercare este de 5 min.
5	Încercarea izolaţiei bandajelor rotorice cu tensiune alternativă mărită (50 Hz)	Se încearcă cu tensiunea de 1000 V. Durata menţinerii tensiunii de încercare este de 1 min.
6	Încercarea izolaţiei reostatelor de reglaj sau de pornire cu tensiune mărită	*a*) Se încearcă cu megohmmetrul de 2500 V. *b*) Se încearcă cu tensiune alternativă (50 Hz) de 1000 V. Încercarea izolaţiei se face la puneri în funcţiune şi reparaţii cu ambele metode, în ordinea arătată. În exploatare (o dată pe an) se execută numai încercarea de la punctul *a*. Valoarea rezistenţei de izolaţie nu se normează. Ea se compară cu datele din fabrică sau iniţiale. Durata menţinerii tensiunii este de 1 min.
7	Măsurarea rezistenţei active a înfăşurării de excitaţie	Rezultatele măsurărilor nu se normează. Ele nu trebuie să difere cu mai mult de 2% faţă de datele din fabrică sau iniţiale.
8	Măsurarea rezistenţei active a reostatelor de reglaj sau de pornire care fac parte din instalaţia maşinii	Se măsoară rezistenţa activă totală şi pe fiecare plot sau derivaţie. Rezultatele măsurărilor nu se normează. Ele nu trebuie să difere cu mai mult de 10% faţă de datele din fabrică sau iniţiale.

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 5.8 (continuare)

Nr. crt.	Denumirea probei	Condițiile probei
9	Verificarea polarității înfășurărilor	Se efectuează la toate înfășurările existente după metoda de curent continuu sau a impedanțelor. Determinarea schemei de legătură a înfășurărilor statorice cu poli auxiliari (înfășurarea de compensație) se face după metoda impedanțelor. Schema definitivă va fi aceea pentru care s-a obținut impedanța minimă. Valorile impedanței nu se normează.
10	Determinarea axei neutre	Se efectuează după metoda de curent continuu. Pozițiile periilor se fixează definitiv și se notează pentru deviațiile minime ale instrumentului de măsură folosit. Valorile deviațiilor nu se normează.
11	Ridicarea caracteristicii de mers în gol la generatoarele de curent continuu	Abaterile față de caracteristicile ridicate în fabrică sau anterior nu trebuie să depășească limitele de precizie ale instrumentelor de măsură folosite.
12	Ridicarea caracteristicii de reglaj a vitezei pentru motoare sau a caracteristicii externe pentru generatoare	*a*) Pentru motoare se verifică limitele de reglaj ale vitezei atît la funcționarea în gol cît și în sarcină. Limitele de reglaj trebuie să corespundă cu datele din proiect. Proba este facultativă. *b*) Pentru generatoare se ridică caracteristica externă: $U=f(I_s)$. Abaterile față de caracteristica dată de fabrică nu trebuie să depășească limitele de precizie ale instrumentelor de măsură folosite. Tot pentru generatoare se ridică și caracteristica de reglaj $I_{ex}=f(I)$ pentru $U=$const și $n=$const.
13	Măsurarea întrefierului dintre rotor și stator	Se face în 4—8 puncte diametrul opuse. Rezultatele nu trebuie să difere cu mai mult de 10% de valoarea medie.
14	Măsurarea vibrațiilor lagărelor	Mărimea vibrațiilor lagărelor la excitatoarele legate direct la axul generatoarelor sau compensatoarelor sincrone se apreciază după normele date la acestea. Mărimile vibrațiilor la celelalte mașini nu trebuie să depășească următoarele valori: Viteza nominală rot/min 3000; 1500 și mai mici. Mărimea vibrației, mm 0,06 ... 0,1.

Scanned with OKEN Scanner

5.3. ÎNTREȚINEREA UNEI MAȘINI DE CURENT CONTINUU ÎN TIMPUL EXPLOATĂRII

5.3.1. Generalități

Pentru a efectua o întreținere corespunzătoare este necesar să se cunoască în amănunțime părțile componente ale mașinii și legăturile dintre aceste părți, construcția lor precum și rolul lor funcțional [60].

În cele ce urmează se va prezenta o scurtă descriere, generală a unei mașini de curent continuu.

O mașină de curent continuu se compune din următoarele părți (fig. 5.3): o carcasă de oțel în interiorul căreia sînt fixați polii principali *1*. Aceștia se compun din cîte un miez pe care se dispune înfășurarea de excitație *2* și o piesă polară *3*.

Miezurile pot fi de construcție masivă, dar cele mai multe ori sînt din tole. Piesele polare se construiesc din tole. Dacă și miezurile sînt din tole, ele pot forma un singur corp cu piesele polare respective. Adesea între polii principali se găsesc și poli auxiliari *4* sau de comutație. De carcasă sînt fixate prin buloane cele două scuturi care poartă lagărele; la mașinile mai mari, arborele rotorului este susținut de lagăre separate de carcasă. Rotorul este făcut din tole *9* presate laolaltă și fixate pe arbore direct sau printr-un butuc. În crestăturile rotorului, deschise sau semiînchise, se află înfășurarea *12* a indusului, legată la colector. Colectorul este alcătuit din lamelele *14* din cupru, separate și izolate între ele prin cîte un strat de micanită și montate în coadă de rîndunică pe un butuc (butucul colectorului) de formă specială, cu ajutorul unui inel de strîngere avînd un profil adecvat. Butucul, la rîndul său, este fixat pe arborele mașinii. Lamelele sînt izolate față de butuc și de inelul de strîngere prin manșoane de micanită. Înfășurarea rotorului este legată la lamelele colectorului prin așa numitele *steguleţe*. Periile, confecționate din cărbune grafitat, uneori din cupru grafitat sau din bronz grafitat, sînt montate în portperii și apăsate cu ajutorul unor arcuri pe suprafața lamelelor. Portperiile sînt fixate într-un suport de portperii, prin intermediul cîte unui ax *15* paralel cu axul mașinii. Suportul de portperii poate fi rotit, împreună cu ansamblul periilor, în jurul axului mașinii. În general, sînt atîtea rînduri de perii cîți poli are mașina. În acest caz, distanța dintre rîndurile de perii este egală cu un pas polar. Polaritatea rîndurilor de perii alternează. Toate periile pozitive, respectiv cele negative, sînt conectate între ele prin cîte un inel colector. Legătura acestor două inele la bornele mașinii se stabilește prin legături flexibile.

În fig. 5.3. este reprezentată o secțiune printr-o mașină de curent continuu de putere mijlocie, iar în fig. 5.4 o secțiune prin motorul TN59 pentru tracțiune urbană.

Scanned with OKEN Scanner

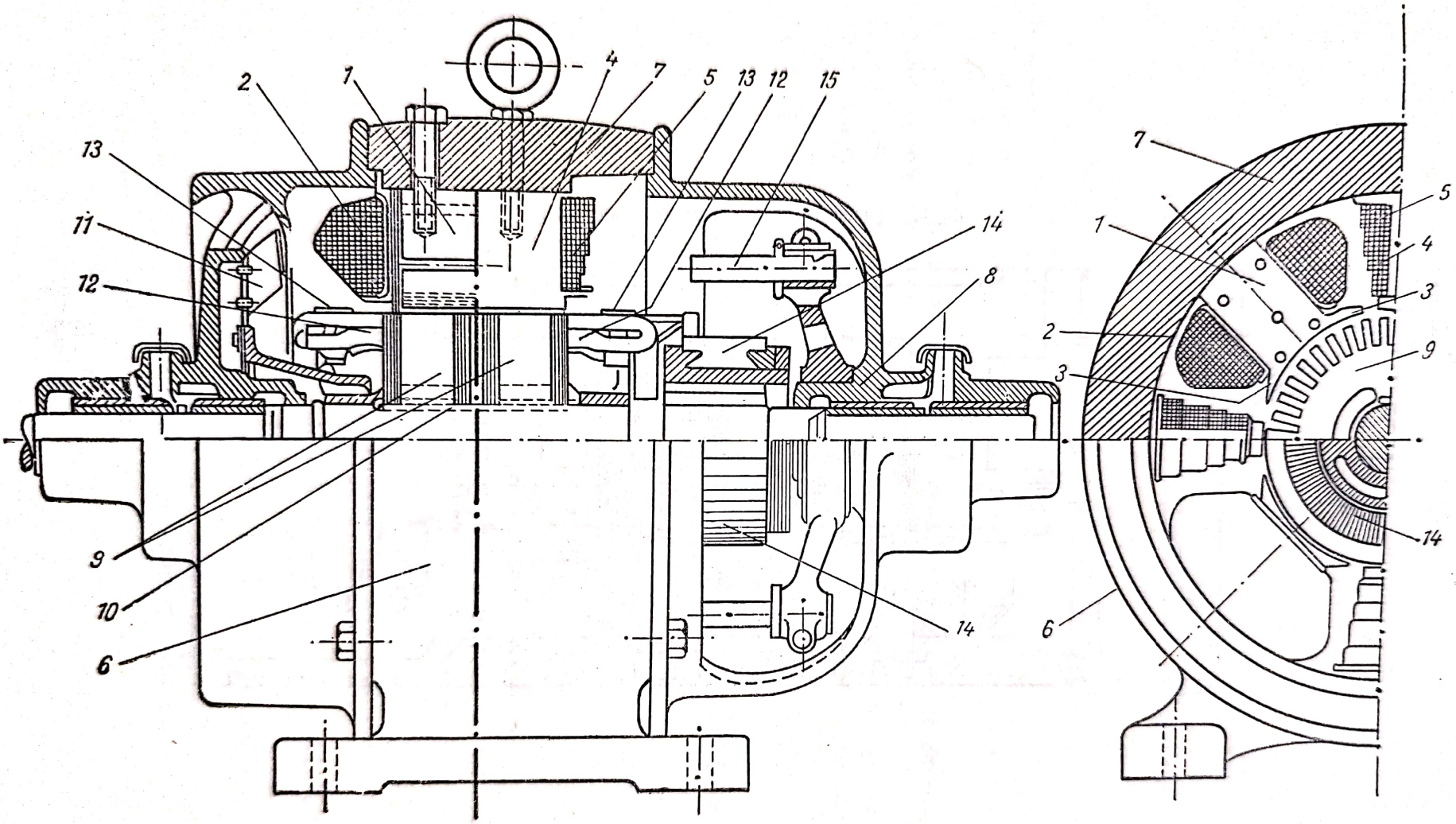


Fig. 5.3. Construcția mașinii de curent continuu:

1 — miezul unui pol principal; *2* — înfășurare de excitație; *3* — piesă polară; *4* — miezul unui pol auxiliar; *5* — înfășurare auxiliară; *6* — carcasă; *7* — jugul statorului; *8* — palier; *9* — corpul rotorului; *10* — canal de ventilație; *11* — ventilator; *12* — înfășurarea indusului; *13* — bandaj; *14* — colector; *15* — portperie.

Scanned with OKEN Scanner

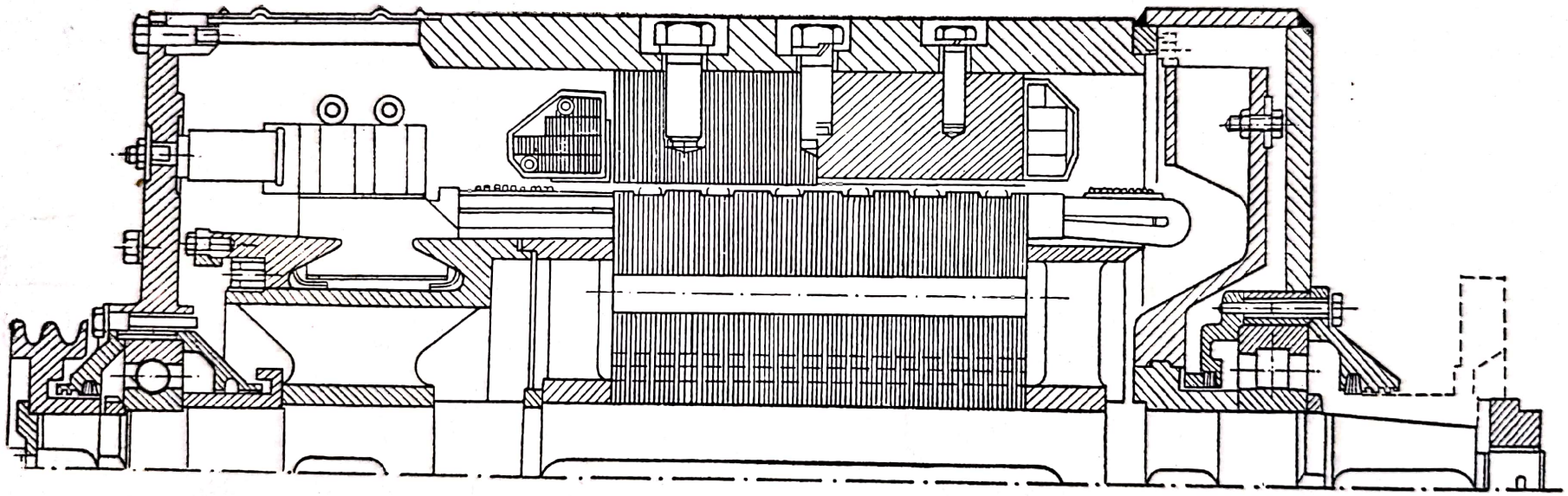


Fig. 5.4. Secțiune prin motorul TN 59.

Scanned with OKEN Scanner

5.3.2. Întreținerea în timpul exploatării

În timpul exploatării mașinii de curent continuu funcționînd ca generator sau ca motor, trebuie să i se asigure o întreținere corespunzătoare a părților componente și în special a acelora supuse uzurii.

La mașinile de curent continuu, o atenție deosebită trebuie acordată întreținerii colectorului portperiilor și periilor.

Întreținerea colectorului. Colectorul are nevoie de o supraveghere și o întreținere deosebită, dat fiind rolul lui în asigurarea unei bune comutații și în buna funcționare a mașinii.

Condiția principală pentru o bună comutație, este ca suprafața colectorului să fie perfect centrată și cît mai bine lustruită.

În timpul funcționării suprafața colectorului capătă un lustru de culoare roșie-brună. O suprafață albastră este un indiciu de suprasolicitări termice din cauza unui curent prea mare.

Înnegrirea tuturor lamelelor colectorului este indiciul unei comutații nesatisfăcătoare sau al unei insuficiente frezări și curățiri a micanitei dintre lamele.

Înnegrirea numai a anumitor lamele este indiciul unor lipituri slabe la steguleţele colectorului sau a întreruperii unor conductoare.

Cînd colectorul a căpătat suprafața lucioasă roșie-brună, este interzisă curățirea colectorului cu materiale abrazive; se poate folosi numai o pensulă de nylon sau o cîrpă moale uscată.

În cazul cînd pe colector se află pete de ulei, cîrpa se umezește ușor cu benzină.

Este cu desăvîrșire interzisă șlefuirea colectorului cu pînză cu carborundum (șmirghel) în timpul funcționării.

Dacă suprafața colectorului are neregularități mici, dar totuși este concentrică se poate curăța cu piatră ponce artificială fină montată pe un suport de lemn avînd curbura colectorului, după ce au fost scoase în prealabil periile.

Dacă suprafața colectorului are neregularități pronunțate din cauza uzurii sau ieșirii unor lamele în afară, astfel încît la rotire *bate*, se procedează la restrunjirea colectorului. Această operație se face pe strung, după demontarea mașinii. La strunjire trebuie să fie prevenită orice posibilitate de pătrundere a așchiilor și prafului de cupru în înfășurare. Pentru aceasta, steguleţele și înfășurarea se lipesc cu hîrtie, care este scoasă după terminarea operației de strunjire și după care se suflă rotorul cu aer comprimat.

Strunjirea se face cu diamant sau cu cuțit dur; cuțitul trebuie să fie ascuțit foarte bine, iar viteza de tăiere trebuie să fie de maximum 1—1,5 m/sec, cu avans la o singură rotație de maximum 0,2 mm și grosimea spanului maximum 0,2 mm.

După strunjire, izolația de micanită dintre lamelele colectorului se frezează la o adîncime de 1—1,5 mm. După frezare se teșesc sau se rotunjesc muchiile de cupru ale șanțului.

Scanned with OKEN Scanner

Întreținerea portperiilor și periilor [79]. Poziția exactă a crucii portperii este determinată de fabrica producătoare în cadrul încercărilor de platformă și însemnată în raport cu scutul. Această poziție este valabilă pentru orice sarcină și nu este permis a o schimba, decît în cazul rebobinării rotorului, cînd trebuie determinată din nou prin încercări.

Portperiile pot fi deplasate radial pentru a compensa uzura colectorului. Ele trebuie fixate astfel încît axa periei să fie radială față de circumferința colectorului, iar distanța între portperie și colector să fie de 2 mm.

Periile trebuie să apese pe colector, fără a vibra sau oscila. Pentru aceasta este necesar ca portperia să fie bine fixată, iar jocul dintre perie și locașul ei din portperie trebuie să fie mic, fără a exista însă pericolul unei înțepeniri. Pentru trecerea curentului electric, sînt prevăzute cabluri de legătură flexibile ale periilor care fac legătura electrică între perie și suportul portperie.

Trebuie să se dea atenție unui bun contact electric al cablului flexibil al periei la suport, altfel se produce o trecere de curent între perie și locașul ei, ceea ce provoacă topiri superficiale locale, stînjenindu-se mobilitatea periilor.

Periile trebuie să se găsească în contact cu colectorul pe toată suprafața. Rodajul lor se execută cu ajutorul unei bucăți de hîrtie sticlată care se așază între perie și colector, cu partea abrazivă spre perie și i se dă o mișcare de dute-vino.

Degetele de presare trebuie să se reazime efectiv pe perii și să producă o forță de apăsare corespunzătoare unei presiuni de 0,2 bar.

Cînd periile s-au uzat atît de mult încît înălțimea lor a scăzut la jumătate din înălțimea lor inițială, ele se vor înlocui cu alte perii, de calitate identică. Este recomandabil, cînd se schimbă periile, să se schimbe toate periile sau cel puțin toate periile unei polarități.

5.4. DEFECTE ȘI REGIMURI ANORMALE DE FUNCȚIONARE

5.4.1. Generalități

În funcționarea mașinilor electrice de curent continuu pot interveni defecțiuni atît la punerea în funcțiune, după ce au fost instalate sau reinstalate, după o reparație capitală sau mutare, cît și după ce au funcționat normal un anumit timp.

Defecțiunile sînt de natura electrică sau mecanică.

Defecțiunile de natură electrică se manifestă prin următoarele efecte mai importante: scîntei la colector, încălzire exagerată, pornire anormală, turație anormală, suprasolicitări scăzute, tensiune anormală la bornele generatorului, repartizarea neuniformă a sarcinii și funcționarea instabilă a generatoarelor, autodemagnetizarea.

Scanned with OKEN Scanner

Defectele de natură mecanică se manifestă prin următoarele efecte mai importante: încălzirea lagărelor, aruncarea de ulei (pentru mașinile cu lagăre de alunecare) și trepidații.

Se va expune în cele ce urmează fiecare fel particular de defect, cum se manifestă, cauza probabilă a defectului și modul de remediere.

5.4.2. Scîntei la colector

La prima punere în funcțiune a unui motor, scînteile la colector provin de obicei din cauza suprasarcinii, a poziției greșite a crucii portperiilor sau a legării greșite a înfășurării polilor de comutație. Toate celelalte cauze privesc motoarele care au lucrat normal pînă la ivirea deranjamentului.

Scînteierea la perii începînd cu o sarcină destul de mare, poate proveni din cauză că se supraîncarcă motorul.

Se măsoară curentul de sarcină sub care lucrează, se reduce curentul de sarcină sau, dacă nu se poate, se schimbă motorul cu unul mai mare.

Scînteierea moderată la perii, începînd cu o anumită sarcină, poate proveni din cauza poziției greșite a jugului periilor sau din cauza grosimii nepotrivite a întrefierului de sub polii de comutație.

În primul caz, jugul periilor trebuie trecut în dreptul semnului. La motoarele fără poli de comutație, jugul trebuie deplasat în sens contrar direcției de rotație a rotorului. Motoarele mai mici și motoarele cu poli de comutație au aceeași poziție a periilor pentru ambele sensuri de rotație.

În al doilea caz, trebuie potrivit întrefierul amintit, prin scoaterea sau punerea de table de fier sub polii de comutație.

Scînteiere la perii, crescînd cu sarcina și foarte puternică în plină sarcină, poate proveni din cauza legării (polarității) greșite a polilor de comutație.

Se verifică legăturile, determinîndu-se polaritatea polilor principali și de comutație cu ajutorul unui ac magnetic, de preferință în partea exterioară a jugului motorului, la capetele piuliților; după un pol principal trebuie să urmeze la motoare, în sensul de rotație, un pol de comutație de aceeași polaritate.

Scînteierea cam de la jumătate pînă la plină sarcină, poate proveni din cauza defectelor mecanice ale colectorului. Se freacă colectorul cu piatră ponce, se strunjește, eventual se pun în ordine lamelele izolante de mică.

Scînteiere egală la toate periile și înnegrirea întregului colector, poate proveni din mai multe cauze:

— Ieșirea lamelelor izolante de mică în afara lamelor de cupru ale colectorului; izolația ieșită se constată prin pipăirea colectorului și se îndepărtează prin frecare cu o pînză șmirghel grosieră, iar pe urmă se canelează pînă la adîncimea de o jumătate de milimetru sub fața lamelelor de cupru ale colectorului.

Scanned with OKEN Scanner

— Materialul nepotrivit (prea tare sau prea moale) sau de calitate inferioară, al periilor. Se schimbă periile cu altele bune și de duritate potrivită (după indicațiile fabricii constructoare);

— Existența pe colector a unor particule conductoare, care se înroșesc sub tensiunea dintre lamelele de cupru ale colectorului. Se curăță colectorul, eventual se freacă cu o pînză șmirghel sau se strunjește;

— Colectorul nu mai este rotund și deci periile joacă, ceea ce se poate constata printr-o vergea de lemn aplicată pe ele. Cînd colectorul este uzat, se strunjește; cînd este strîmbat din cauza slăbirii buloanelor, i se strîng mai întîi buloanele și pe urmă se strunjește.

— Motorul trepidează; se examinează dacă buloanele de fundație sînt strînse și se strîng la nevoie; dacă motorul are curea, se examinează dacă merge liniștit fără ea, și, dacă da, se examinează cureaua sau discul comandat; în astfel de cazuri, de obicei îmbinarea curelei nu este în ordine și necesită reparații;

— Scurtcircuite interioare din înfășurarea de excitație. Se desfac legăturile dintre bobinele de excitație și se verifică fiecare bobină în parte prin măsurarea tensiunii induse. Tensiunile măsurate la bornele fiecărei bobine nu trebuie să difere cu mai mult de 10%. În cazul cînd diferențele sînt mai mari, se schimbă bobinele de tensiunea cea mai mică.

Scînteiere în sarcină, mai puternică la periile unei axe decît la ale celeilalte; aceasta poate proveni din cauza unui scurtcircuit interior din înfășurarea de comutație corespunzătoare, sau dintr-un defect mecanic al sistemului de portperii. Se măsoară rezistențele înfășurărilor amintite și se înlocuiește bobina defectă, dacă este cazul; se examinează toate înșurubările sistemului de portperii și se strîng cele slăbite, dacă este cazul.

Scînteiere mai puternică la periile unui pol decît la ale celuilalt, însoțită de obicei de o încălzire prea mare a rotorului chiar și la funcționarea în gol și uneori înnegrirea întregului colector. Aceste fenomene pot proveni din cauza unei centrări necorespunzătoare a rotorului cauzată la rîndul ei, fie de uzarea lagărelor de alunecare, fie de montarea greșită a motorului. Se înlocuiesc în primul caz cuzineții lagărelor de alunecare; uzura cuzineților se constată observînd dacă axa motorului joacă în lagăr perpendicular sau paralel cu cureaua. În al doilea caz se centrează rotorul prin reajustarea cuzineților sau deplasarea carcasei polilor.

Scînteiere însoțită de înnegrirea unor lamele de cupru la anumite distanțe de pe colector, corespunzătoare numărului de perechi de poli, care se înnegresc iarăși după ce au fost curățite; acest defect poate proveni fie din cauza contactului slab dintre racordurile la colector și lamelele colectorului sau înfășurarea rotorului, fie din cauza unei lipituri necorespunzătoare la înfășurarea de compensație.

Defectul se constată în primul caz încercînd cu o tijă de fier ascuțită dacă conductoarele rotorului joacă în racordurile la colector, sau prin batere ușoară dacă aceste racorduri se mișcă în lamele. Se lipește locul defect, respectiv se pune rotorul în ordine. În cazul cînd se dispune de

Scanned with OKEN Scanner

un milivoltmetru sensibil lipsa de contact dintre racordurile la colector şi lamela colectorului se face prin măsurarea rezistenţei de contact.

În acest scop se alimentează colectorul cu curent în două puncte plasate la o distanţă fixă pe colector şi se măsoară diferenţa de potenţial între lamelele vecine cu ajutorul unui milivoltmetru sensibil.

Scînteiere puternică, însoţită de înnegrirea unor anumite lamele de cupru şi de erodarea sau arderea izolaţiei dintre două sau mai multe lamele, şi uneori de scîntei pocnitoare la scăparea de sub perii a locurilor defecte, poate proveni din cauza rupturii unui conductor dintr-o bobină rotorică legată la lamelele cu defect.

Se cercetează dacă nu s-a desprins vreo lipitură dintre colector şi înfăşurarea rotorului sau dacă nu s-a rupt vreun conductor dintre racordul la colector şi o bobină rotorică sau, ceea ce se întîmplă mai rar, dacă ruptura nu este în interiorul bobinei. Se lipeşte, după ce s-a înlăturat o eventuală legătură conductoare dintre cele două lamele, respectiv se repară înfăşurarea. În cazuri urgente şi dacă scînteierea nu este prea puternică, se poate despărţi provizoriu bobina defectă de cele două lamele, care se pot scurtcircuita pe urmă.

Scînteierea însoţită de înnegrirea lamelelor din două în două sau din trei în trei, poate proveni din cauză că se mişcă colectorul. Se strînge din nou colectorul.

Scînteierea însoţită de o înnegrire care se schimbă de la unele lamele la altele după ce se curăţă primele, poate proveni de la ieşirea uşoară a izolaţiei de mică dintre lamelele de cupru.

Se strunjeşte colectorul, se trece cu pînza şmirghel peste el, se canelează prin zgîriere izolaţia de mică pînă la o jumătate de milimetru sub faţa liberă a lamelelor de cupru.

Scînteierea fără regularitate a unora din perii, care se pot încălzi pe cînd celelalte rămîn reci, poate proveni, fie din cauză că periile au contact rău cu portperiile, fie din cauză că periile legate între ele sînt de calităţi diferite.

În primul caz se strîng şuruburile slăbite şi se aşază bine pe perii degetele de apăsare; în cazul al doilea, se înlocuiesc periile de diferite calităţi prin perii de aceeaşi calitate.

Scînteiere însoţită de turaţie prea mare la tensiune la borne normală, poate proveni din cauza poziţiei greşite a periilor pe colector, din cauza unei rezistenţe montate din eroare în serie cu înfăşurarea de excitaţie sau din cauza legăturii greşite a acestor înfăşurări, ceea ce produce o distorsiune a cîmpului magnetic şi deci curenţi de circulaţie interioară în bobinele înfăşurării rotorului.

În primul caz, se corectează poziţia periilor; în al doilea, se îndepărtează sau se micşorează rezistenţa în serie amintită; în al treilea, se leagă corect înfăşurările polilor, adică astfel încît după fiecare pol sud să urmeze unul nord, şi după unul nord unul sud.

Scînteierea mai puternică într-un sens de rotaţie decît în celălalt, poate proveni din cauza poziţiei greşite a periilor pe colector.

Se îndreaptă poziţia periilor pe colector, astfel încît, la aceeaşi tensiune la borne, motorul să aibă aceeaşi turaţie în amîndouă sensurile.

Scanned with OKEN Scanner

Scînteierea puternică şi bruscă la schimbarea sensului (reversare) *de rotaţie al motoarelor*, poate proveni din cauza schimbării (reversării) prea rapide.

Se face mai lent reversarea. Dacă se cere reversare rapidă şi motorul nu are poli de comutaţie, se poate eventual adapta motorul la această solicitare prin aplicarea unor astfel de poli. Altfel, trebuie să se întrebuinţeze un motor mai mare decît pentru puterea mecanică necesară, spre a i se putea face normal schimbarea rapidă a sensului de rotaţie.

Scînteiere însoţită de strat de oxid pe suprafaţa colectorului, care se formează din nou, după ce a fost îndepărtat, chiar şi dacă motorul stă, provine din cauza atacului unor gaze sau vapori, de obicei acizi.

Înainte de fiecare punere în funcţiune se trece cu pînza şmirghel fină peste colector. Dacă periile sînt de cărbune, moi, se recomandă înlocuirea cu perii tari. Aceste măsuri se recomandă numai pentru acest caz particular.

5.4.3. Încălzirea exagerată

La prima punere în funcţie, încălzirea anormală a motoarelor provine din cauza supratensiunii sau a succesiunii greşite a polilor. Alte situaţii se expun în cele ce urmează:

Încălzire exagerată însoţită de scîntei la colector şi eventual de turaţie prea mică la tensiunea de borne normală, poate proveni din cauza supraîncărcării sau a unui curent de excitaţie prea mare. Existenţa unui asemenea curent se datoreşte fie unei reglări necorespunzătoare a reostatului de excitaţie, fie a montării greşite a bobinelor de excitaţie (legare în paralel în loc de legare în serie).

Se scade sarcina sau, dacă nu se poate, se înlocuieşte motorul cu unul mai mare. Cînd turaţia scăzută provine din cauza prea micii rezistenţe din înfăşurarea de excitaţie, aceasta trebuie mărită sau montată dacă lipseşte cu totul; cînd provine din cauza legăturii în paralel a bobinelor de excitaţie, acestea trebuie legate în serie.

Încălzirea exagerată şi inegală a unor bobine de excitaţie, însoţită eventual de scîntei la colector şi de încălzire exagerată a rotorului poate proveni din cauza unui scurtcircuit interior sau total al bobinelor de excitaţie.

Se înlocuiesc bobinele defecte. Bobinele defecte se încălzesc cel mai puţin, fiindcă nu sînt parcurse de curent. Cele bune se încălzesc anormal, fiindcă trece prin ele un curent de excitaţie prea mare din cauza scăderii rezistenţei totale a înfăşurării de excitaţie, ca urmare a scurtcircuitului total sau interior în celelalte bobine.

Încălzirea exagerată însoţită de o turaţie prea mare a motorului poate proveni din cauza succesiunii greşite a polilor cauzată la rîndul ei de legarea greşită a bobinelor de excitaţie. S-a tratat în paragraful precedent.

Încălzire exagerată însoţită de obicei de refuzul motorului de a porni poate proveni din cauza scurtcircuitului din una sau mai multe bobine din rotor, care poate fi la rîndul său interior, sau la colector.

Scanned with OKEN Scanner

Se rebobinează bobina defectă respectiv, se îndepărtează nervurile metalice care scurtcircuitează lamelele de cupru ale colectorului prin strunjirea şi netezirea lui şi prin canelarea lamelelor de mică.

5.4.4. Pornire anormală

La prima punere în funcţiune a unui motor nou, pornirea trebuie să fie normală, dacă nu există deranjamente în legături sau nepotriviri la pornitor. Totuşi, atît la punerea în funcţiune, cît şi în timpul exploatării pot apărea următoarele defecte:

Refuzul de a porni chiar şi în gol poate surveni în următoarele situaţii:

— cînd nu trece curent în înfăşurarea rotorului deşi pornitorul este cuplat, a sărit siguranţa, a declanşat automatul de protecţie, este ruptă legătura dintre pornitor şi motor sau din pornitor, pornitorul este legat greşit, este ruptă înfăşurarea rotorului sau periile sînt înţepenite din cauza murdăriei în portperii şi nu mai ating colectorul. Se înlocuieşte siguranţa sărită sau se cuplează automatul de protecţie, dacă este cazul; se caută ruptura legăturii cu pornitorul sau din pornitor şi se restabileşte; se leagă corect pornitorul; se repară înfăşurarea rotorului cum s-a arătat pentru cazul scînteilor la colector, respectiv se curăţă portperiile;

— cînd trece curent prin înfăşurarea rotorului (iar acesta din urmă dacă nu are o masă prea mare poate fi rotit cu uşurinţă cu mîna) şi după aceea porneşte în gol dar nu în sarcină, cîmpul magnetic este prea slab din cauza unei întreruperi a înfăşurării de excitaţie sau a legării greşite a pornitorului sau din cauza succesiunii greşite a polilor. Se înlătură ruptura, se leagă corect pornitorul dacă este cazul, respectiv se stabileşte succesiunea corectă a polilor;

— cînd trece curent prin înfăşurarea rotorului iar acesta din urmă poate fi rotit cu uşurinţă cu mîna şi după aceea porneşte în gol, dar şi în sarcină cînd pornitorul se găseşte în poziţia de mers, pornitorul este legat greşit. Se corectează legătura pornitorului;

— cînd trece curent atît prin înfăşurarea rotorului cît şi prin înfăşurarea de excitaţie, iar rotorul nu poate fi rotit cu mîna decît cu dificultate şi înfăşurarea rotorului se încălzeşte, una sau mai multe bobine din rotor sînt scurtcircuitate.

Acest caz a fost amintit sub punctul 5.4.2.

Pornire sacadată, cînd pornitorul este acţionat parţial, şi anume în dreptul unui contact ars poate proveni din cauza unei rupturi a pornitorului în dreptul contactului amintit.

Se cercetează pornitorul cu lampa de încercare şi se înlătură ruptura sau se înlocuieşte pornitorul cu unul corespunzător.

Pornire grea, însoţită de încălzirea pornitorului şi de sărirea siguranţei sau declanşarea automatului poate proveni din cauza:

— scurtcircuitului sau punerii la pămînt a conductoarelor de legătură dintre motor şi pornitor;

— punerii la masă a înfăşurării motorului;

Scanned with OKEN Scanner

— întreruperii circuitului de excitaţie;
— poziţiei greşite a periilor pe colector.

În cazul întîi, se desprind de la cutia de borne a motorului conductoarele de legătură dintre motor şi pornitor, se cercetează scurtcircuitul sau punerea la masă şi se înlătură defectul.

În cazul al doilea, se desprind conductoarele de la cutia de borne, se îndepărtează periile de pe colector şi se caută cu lampa de încercare punerea la masă a înfăşurării de excitaţie a înfăşurării rotorului sau a buloanelor periilor şi se înlătură defectul.

În cazul al treilea, se trece hîrtie între perii şi colector, se cuplează pornitorul, se încearcă cu o cheie de oţel dacă polii sînt destul de magnetizaţi, se localizează ruptura şi se înlătură.

În cazul al patrulea, se trece jugul periilor în dreptul semnului; în lipsa acestuia, poziţia corectă se găseşte prin încercări.

Pornire sacadată, însoţită de un curent anormal de mare poate proveni din cauza unui scurtcircuit între două bobine (secţiuni) ale rotorului.

Se ridică periile, se cuplează pornitorul astfel încît polii să fie excitaţi complet şi se încearcă să se rotească rotorul cu mîna. Dacă există două poziţii în care rotorul se roteşte foarte greu există scurtcircuit între două secţiuni din rotor. Se înlătură scurtcircuitul.

5.4.5. Turaţie anormală

Ambalare în sarcină a motoarelor după ce au pornit bine în gol, poate proveni din cauza poziţiei greşite a periilor pe colector, şi anume cînd sînt prea departe de zona neutră.

Se aduce jugul periilor în dreptul semnului, în lipsa acestuia se stabileşte prin încercări poziţia corectă.

Pendulare a turaţiei în sarcină sau la slăbirea excitaţiei, însoţită de mers normal în gol, poate proveni din cauză că periile stau puţin prea în urmă faţă de zona neutră sau din cauză că, la maşinile cu excitaţie mixtă, excitaţia în serie lucrează în sens contrar cu cea din paralel.

Se aduc periile în poziţia normală, respectiv se intervertesc legăturile excitaţiei în serie.

Turaţie în sens greşit provine din cauza legăturii greşite a motorului.

Se intervertesc conductele principale şi piesa de legătură.

5.4.6. Posibilităţi de încărcare reduse

Încărcabilitatea scăzută din cauza încălzirii, provine din cauzele arătate la încălzirea exagerată a motoarelor şi se remediază, cum s-a arătat la paragraful 5.4.3.

Încărcabilitatea scăzută din cauza cuplului, poate proveni din cauza tensiunii la borne prea scăzută.

Se iau măsuri ca tensiunea la borne să aibă valoarea normală, mărind de exemplu secţiunile conductoarelor de alimentare şi altele.

Scanned with OKEN Scanner

5.4.7. Tensiune anormală a generatorului

Generatorul nu se excită; acul magnetic apropiat de piesele polare nu indică o anumită polaritate (unul şi acelaşi pol al maşinii atrage cînd capătul *nord* cînd capătul *sud* al acului).

Generatorul şi-a pierdut magnetismul remanent.

Se va remagnetiza maşina, utilizîndu-se o sursă de curent din afară (o baterie de acumulatoare, panoul general de distribuţie sau o altă maşină). Pentru ca polaritatea maşinii să fie corectă, sensul curentului de remagnetizare din bobinajul de excitaţie trebuie să corespundă cu sensul curentului de excitaţie la funcţionarea normală a generatorului.

Conectarea şi deconectarea se vor efectua printr-un reostat pentru a se preîntîmpina străpungerea izolaţiei din cauza supratensiunilor de comutaţie.

Acul magnetic aşezat lîngă piesele polare, arată că polaritatea maşinii este corectă, însă generatorul nu se excită (chiar după remagnetizarea maşinii); cauzele acestui defect pot fi:

— periile nu sînt bine amplasate; la remontarea maşinilor noi expediate demontate de către uzina producătoare, cum şi la asamblarea maşinilor după revizii sau reparaţii, portperiile au fost fixate incorect, adică invers de cum ar fi trebuit, şi cu toate că tija este fixată la semnul uzinei ele se găsesc departe de axa neutră;

— sensul de rotaţie a maşinii nu este corect sau înfăşurarea de excitaţie în derivaţie este conectată greşit cu rotorul. Din această cauză, acţiunea de automagnetizare a maşinii se opune acţiunii magnetismului remanent.

Se va schimba sensul de rotaţie sau, în cazul unor conexiuni greşite, se vor modifica conexiunile înfăşurării de excitaţie în conformitate cu sensul de rotaţie şi cu schema din fişa tehnică a maşinii, iar în lipsa acesteia după schema normală.

Înfăşurarea de excitaţie în derivaţie este pusă la masă (pămînt) în două locuri. Se va înlătura punerea la masă;

— există o atingere între spire sau scurtcircuit în una sau în cîteva din bobinele de excitaţie. Se va înlătura scurtcircuitul;

— în înfăşurarea rotorului, între lamelele sau între steguleţele colectorului este un scurtcircuit;

— înfăşurarea rotorului este întreruptă sau are un contact imperfect;

— regulatorul sau reostatul de excitaţie este conectat greşit; se va verifica şi se va efectua conectarea regulatorului de excitaţie cu generatorul după schema uzinei;

— circuitul de excitaţie este întrerupt sau are un contact imperfect; rezistenţa circuitului de excitaţie este prea mare (mai mare decît cea critică), în majoritatea cazurilor defectul se află în regulatorul (reostatul) de excitaţie, iar mai rar în înfăşurarea maşinii; adesea întreruperea este provocată de murdărirea contactelor regulatorului (reostatului); se va căuta locul întreruperii sau contactul imperfect; se va înlătura defectul; în cazul unei întreruperi în înfăşurare, bobina întreruptă se va rebobina

Scanned with OKEN Scanner

sau se va înlocui cu alta nouă, se va micșora valoarea rezistenței nereglabile din circuitul de excitație; se vor examina și se vor curăți contactele regulatorului de excitație.

Generatorul se excită numai în cazul în care presiunea periilor este foarte mare; defectul se datorește următoarelor cauze:

— rezistența de trecere între colector și perii este prea mare;

— a ieșit izolație dintre lamelele colectorului;

— presiunea periilor greșit reglată inițial.

Tensiunea la bornele generatorului este mai mică decît cea nominală; acest defect este cauzat de:

— turația rotorului generatorului este mai mică decît cea nominală. Se va verifica turația motorului primar, se va verifica de asemenea (cînd este cazul) dacă alegerea șaibelor în cazul transmisiei cu curele a fost făcută corect;

— unele din bobinele polilor sînt greșit conectate între ele. Se va verifica polaritatea polilor principali;

există o atingere între spire sau scurtcircuit în una sau în cîteva din secțiunile înfășurării de excitație în derivație.

La funcționarea în gol, tensiunea la bornele generatorului este normală, în sarcină tensiunea generatorului scade mult; cauzele pot fi:

— turația motorului primar scade sau alunecarea curelelor sau a cablurilor de transmisie crește. Dacă motorul primar este de tip asincron, scăderea turației poate fi provocată de un eventual defect al acestuia; se va elimina cauza care provoacă scăderea turației în sarcină la motorul primar sau cauza care a dus la mărirea alunecării curelelor sau cablurilor (funiilor). Se va verifica circuitul motorului asincron;

— polaritatea polilor auxiliari este greșită, respectiv alternarea polilor principali cu cei auxiliari este greșită. Un asemenea defect la fel ca și conectarea greșită a înfășurării serie provoacă o mare scădere de tensiune în sarcină și de obicei este însoțită de o scînteiere intensă a periilor; se va verifica polaritatea polilor auxiliari;

— la generatoarele cu excitație mixtă, înfășurarea serie este conectată greșit. Acțiunea cîmpului magnetic și înfășurării de excitație serie se opune secțiunii înfășurării de excitație derivație; se vor schimba între ele capetele înfășurării serie; se va verifica polaritatea polilor: în cazul conectării înfășurării de excitație derivație și în cazul conectării înfășurării de excitație serie.

Generatorul deconectat de la rețea are tensiunea normală; periile nu scînteiază; la conectarea generatorului în rețea tensiunea scade, cu toate că turația generatorului este normală. Scăderea de tensiune este de obicei însoțită de scînteierea periilor; cauza este localizată în înfășurarea de excitație derivație sau în regulatorul de excitație, care face atingerea cu carcasa. Dacă rețeaua funcționează în permanență cu un pol legat la pămînt sau dacă în urma unui defect oarecare intervine o punere la pămînt, înfășurarea de excitație derivație este șuntată, aceasta provocînd slăbirea cîmpului magnetic.

Se va căuta locul atingerii cu carcasa a înfășurării derivație sau a regulatorului de excitație și se va înlătura. Dacă locul atingerii se află

Scanned with OKEN Scanner

în interiorul unei bobine, aceasta se va rebobina sau se va înlocui cu alta nouă.

Generatorul debitează o tensiune mărită atît la funcţionarea în gol cît şi la funcţionarea în sarcină; alte defecte nu se observă.

Cauzele pot fi:

— turaţia este mai mare decît cea nominală. Se va regla turaţia;

— rezistenţa regulatorului de tensiune este prea mică. Se va conecta în circuitul de excitaţie a generatorului în serie o rezistenţă adiţională constantă sau se va înlocui regulatorul cu un altul care posedă o rezistenţă mai mare.

Tensiunea generatorului deconectat de la reţea este normală, regulatorul de excitaţie acţionează bine; la conectarea generatorului în reţea tensiunea creşte; mişcarea manetei regulatorului de excitaţie nu provoacă nici o variaţie a tensiunii; în unele cazuri influenţa regulatorului este numai parţială, iar în alte cazuri nu influenţează de loc; cauza este regulatorul pus la masă sau conductorul care uneşte regulatorul cu înfăşurarea de excitaţie derivaţie a generatorului pus la masă. Dacă reţeaua este legată sau pusă la pămînt (sau la masă) regulatorul este şuntat parţial sau total, curentul de excitaţie creşte provocînd astfel creşterea tensiunii. Se va căuta locul punerii la masă şi se va înlătura.

5.4.8. Repartizarea neuniformă a sarcinii şi funcţionarea instabilă a generatoarelor

La generatoarele cu excitaţie în derivaţie, care funcţionează în paralel, în cazul variaţiei sarcinii, aceasta este repartizată neuniform şi nu în concordanţă cu puterea generatoarelor. Cînd sarcina este maximă, unul din generatoare se încarcă cu cea mai mare parte din sarcină; cauzele acestui defect se expun în cele ce urmează:

Caracteristicile externe ale generatoarelor nu sînt identice (adică curbele care caracterizează variaţia tensiunii în funcţie de variaţia sarcinii nu sînt la fel sau turaţiile motoarelor primare sînt diferite).

Pentru ca sarcina să fie în mod automat uniform repartizată şi în mod corespunzător cu puterea generatoarelor prevăzute cu excitaţie în derivaţie, tensiunea generatoarelor trebuie să varieze la fel, iar scăderea relativă a turaţiei motoarelor primare, în intervalul de la funcţionare în gol şi pînă la sarcina nominală, trebuie să fie identică. Dacă aceste condiţii nu sînt îndeplinite, atunci distribuirea uniformă a sarcinii între generatoare se realizează printr-un reglaj corespunzător al excitaţiei acestora.

Distribuirea automată a sarcinii între generatoarele care au caracteristicile externe deosebite se poate obţine fie mărind căderea de tensiune a generatorului care se încarcă mai mult, fie micşorînd căderea de tensiune a celui de al doilea generator. Aceasta se poate realiza printr-o deplasare foarte mică a tijelor cu portperii, dacă astfel nu se provoacă o scînteiere prea mare a periilor. Deplasînd periile în sensul de rotaţie al

Scanned with OKEN Scanner

rotorului, căderea de tensiune în generator creşte, iar în sens contrar, se micşorează.

Dacă prin deplasarea periilor nu se poate realiza o distribuire uniformă a sarcinii, atunci ca măsură temporară, în circuitul generatorului cu cădere de tensiune mai mică, se introduce o rezistenţă auxiliară de valoare nu prea mare (aceasta face însă să scadă randamentul instalaţiei).

Ca mijloace care contribuie în mod radical la asigurarea repartiţiei uniforme a sarcinii sînt: reglarea întrefierului dintre rotor şi polii principali ai generatorului cum şi utilizarea unor înfăşurări de compensaţie.

La maşinile cu două colectoare, repartizarea sarcinii pe generatoare poate varia în timpul funcţionării fără cauze evidente; curăţirea unuia din colectoare provoacă adesea o schimbare în distribuirea sarcinii; cauza acestui defect constă în faptul că rezistenţa de trecere dintre colectoare şi perii sau rezistenţa contactelor circuitului curentului debitat sau primit este inegală.

Se vor folosi la ambele colectoare numai perii de aceeaşi marcă. Toate conductoarele se vor distribui în aşa fel, încît rezistenţa lor în circuitul ambelor colectoare să fie identică. Se vor verifica toate contactele circuitului curentului de sarcină. Curăţirea ambelor colectoare trebuie să se facă simultan.

Pentru realizarea unei distribuţii uniforme a sarcinii în circuitul unuia din colectoare se înseriază în unele cazuri o rezistenţă reglabilă nu prea mare (o rezistenţă prea mare micşorează simţitor randamentul maşinii).

Se admite ca diferenţa dintre valorile curenţilor celor două colectoare să fie maximum 10%.

La funcţionarea în paralel a generatoarelor cu excitaţie mixtă se observă variaţii mari ale sarcinii unora dintre generatoare, adesea se observă magnetizarea inversă a unuia din generatoare, însoţită de o scînteiere intensă a periilor; cauza constă în lipsa conductorului de egalizare dintre înfăşurările serie ale generatoarelor. Fără conductor de egalizare nu este posibilă funcţionarea stabilă a generatoarelor cu excitaţie mixtă.

Se va conecta un conductor de egalizare (fig. 5.5) cu o secţiune corespunzătoare curentului care îl străbate. Pentru asigurarea stabilităţii funcţionării în paralel a generatoarelor, rezistenţa conductoarelor de egalizare trebuie să fie mai mică decît suma rezistenţelor înfăşurărilor de excitaţie serie ale ambelor generatoare; este de preferat ca rezistenţa conductorului de egalizare să fie mai mică decît rezistenţa înfăşurării serie a oricărui dintre generatoare. Dacă aceste condiţii nu sînt îndeplinite, chiar dacă există conductoare de egalizare, funcţionarea în paralel a generatoarelor nu va fi stabilă şi generatoarele se vor demagnetiza. Conexiunile se vor realiza după schema din fig. 5.5. Ampermetrele A_1 şi A_2 şi întreruptoarele automate I_1 şi I_2 (dacă există) trebuie să fie conectate aşa cum este indicat în schemă. Dacă ampermetrele se vor conecta pe acelaşi conductor cu înfăşurarea de excitaţie serie, nu se va putea determina neuniformitatea distribuţiei sarcinii între generatoare, din cauza curenţilor de egalizare care pot trece prin conductorul de egalizare. La

Scanned with OKEN Scanner

deconectarea unuia din întreruptoarele automate, generatorul deconectat va continua să funcţioneze ca motor.

La conectarea în paralel a generatoarelor, se conectează mai întîi întreruptoarele cu pîrghie Ip_1 şi Ip_2; deconectarea se face în ordine inversă, adică întîi se deconectează întreruptorul cu pîrghie Ip_2 şi apoi întreruptorul cu pîrghie Ip_1.

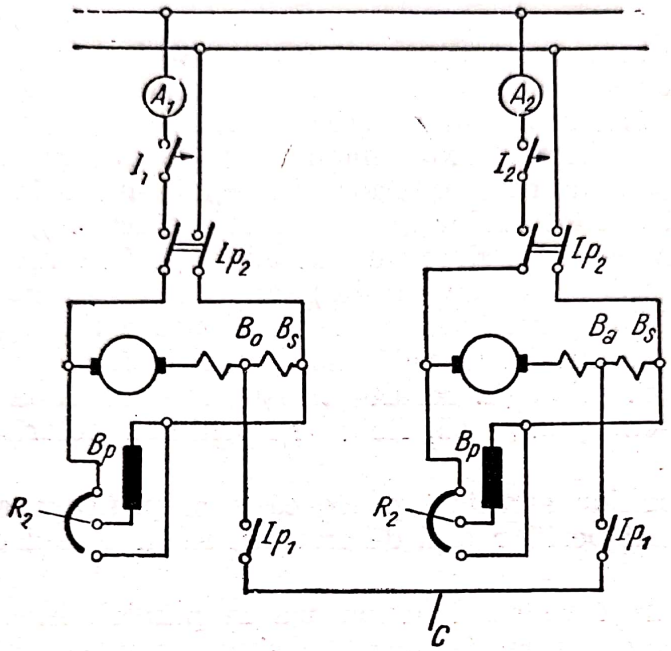


Fig. 5.5. Schema conectării în paralel a generatoarelor cu excitaţie mixtă:
A_1, A_2 — ampermetre; I_{p1}, I_{p2} — întreruptoare cu pîrghie; R_2 — regulator de excitaţie; I_1, I_2 — întreruptoare automate; B_a — bobinajul bolilor auxiliari; B_p — bobinajul de excitaţie în derivaţie; B_s — bobinajul de excitaţie în serie; C — conductor de egalizare.

Pentru a exclude posibilitatea unor manevre greşite la conectarea şi deconectarea generatoarelor, se pot utiliza, în loc de întreruptoare monopolare cu pîrghie Ip_1 şi întreruptoarele cu pîrghie bipolare Ip_2, întreruptoare cu pîrghie tripolare.

Sarcina generatoarelor variază, alte defecte nu se observă; acest defect se explică în cele ce urmează.

Dacă variaţiile sarcinii nu sînt provocate de receptoarele consumatorilor, cauza acestora este fie un defect al motorului primar, fie o alunecare neuniformă în transmisia prin curele. Dacă motorul primar este asincron, atunci defectarea rotorului acestuia poate provoca variaţia sarcinii generatorului.

Se va modifica motorul primar şi alunecarea curelelor sau a cablurilor.

Scanned with OKEN Scanner

Dacă în circuitul de excitaţie a generatorului este un contact imperfect, se va verifica circuitul de excitaţie a generatorului.

5.4.9. Autodemagnetizare şi remagnetizarea generatorului

Generatorul cu excitaţie în derivaţie nu se excită sau nu şi-a schimbat polaritatea periilor, respectiv s-a demagnetizat sau s-a magnetizat în sens invers (s-a remagnetizat); aceasta se poate întîmpla cînd periile sînt deplasate faţă de axa neutră în sensul de rotaţie a maşinii, astfel încît solenaţia înfăşurării rotorului va crea un flux magnetic longitudinal demagnetizat care slăbeşte fluxul magnetic principal creat de înfăşurarea în derivaţie. Dacă circuitul exterior al maşinii are o inductanţă proprie (cum este cazul excitatoarelor generatoarelor sincrone), în cazul mişcării prea rapide a manetei regulatorului de excitaţie în direcţia măririi rezistenţei (şi deci a micşorării curentului) sau din cauza unui contact imperfect în circuitul înfăşurării de excitaţie, se poate întîmpla ca în înfăşurarea rotorului curentul să scadă mai încet decît curentul de excitaţie. Din această cauză solenaţia rezultantă îşi poate schimba semnul iar maşina fie că se demagnetizează, fie că îşi schimbă polaritatea periilor (se remagnetizează).

Existenţa polilor auxiliari provoacă o amplificare a demagnetizării în cazul deplasării periilor faţă de axa neutră în sensul de rotaţie a maşinii.

Generatoarele care nu funcţionează în paralel, în cazul demagnetizării sau al remagnetizării, îşi pierd tensiunea sau îşi schimbă polaritatea periilor, fără semne exterioare deosebite. În cazul generatoarelor care funcţionează în paralel, demagnetizarea şi remagnetizarea sînt însoţite de o scînteiere intensă a periilor, iar în unele cazuri chiar de cerc de foc la colector.

Remagnetizarea excitatoarelor generatoarelor sincrone poate fi provocată şi de influenţa energiei magnetice a rotorului generatorului, cînd intensitatea curentului din înfăşurarea derivaţie a excitatoarei variază brusc. Acest fenomen se explică uşor (fig. 5.6). Sensul curentului în timpul funcţionării normale a generatorului este arătat în fig. 5.6, *a*. La o deplasare prea rapidă a manetei regulatorului de excitaţie, în sensul măririi rezistenţei lui, sau la deconectarea şi conectarea rapidă a circuitului înfăşurării derivaţie (de exemplu, din cauza unui contact slab în regulator), tensiunea excitatoarei şi curentul din înfăşurarea derivaţie a excitatoarei, vor scădea rapid. Prin urmare, se micşorează şi curentul din înfăşurarea rotorică a generatorului sincron. Însă cîmpul pe cale de micşorare al generatorului va provoca în înfăşurarea rotorică supracurenţi care vor tinde să menţină neschimbată valoarea curentului în rotoric şi de aceea rotorul, din receptor, se transformă în sursă de curent. În acest caz curentul îşi poate schimba sensul, aşa cum este indicat în fig. 5.6, *b*. În raport cu înfăşurarea în derivaţie, acest curent are un sens opus celui normal şi excitatoarea, în urma acestui fenomen, se remagnetizează.

Scanned with OKEN Scanner

Remagnetizarea excitatoarei poate avea loc de asemenea şi în cazul unui scurtcircuit brusc al generatorului. În descreştere, cîmpul generatorului va provoca supracurenţi în înfăşurarea rotorică, transformînd astfel rotorul în sursă de curent. Fenomenul este analog cu cel de mai înainte, repartiţia curentului fiind aceeaşi ca şi în fig. 5.6, *b*.

Scînteierea periilor excitatoarei poate provoca de asemenea remagnetizarea ei. Intensificarea în mod brusc a scînteierii are un efect echivalent cu introducerea unei rezistenţe mari în circuitul rotorului. Din această cauză o parte a curentului rotorului generatorului sincron se ramifică în înfăşurarea derivaţie a excitatoarei, provocînd remagnetizarea ei.

Se va magnetiza din nou generatorul utilizîndu-se o sursă externă de curent şi observînd ca polaritatea să fie corectă.

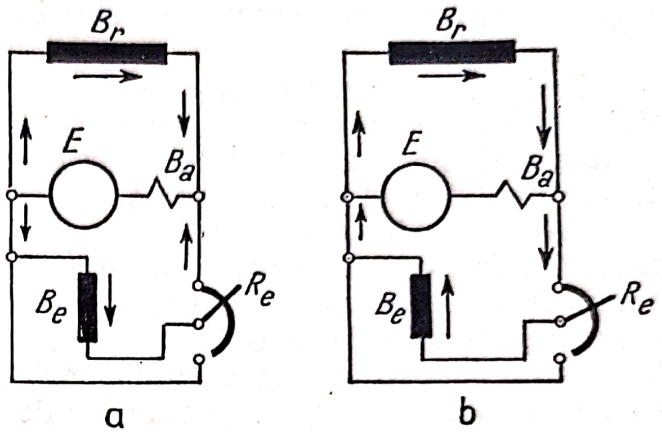


Fig. 5.6. Remagnetizarea excitatoarei:
a — sensul curentului la funcţionarea normală;
b — sensul curentului în timpul remagnetizării.

Se vor aşeza periile pe axa neutră. În cazurile în care demagnetizarea apare şi după aşezarea periilor pe axa neutră, trebuie să se deplaseze periile cu 1—2 lamele de colector în sens contrar sensului de rotaţie a maşinii, dacă această deplasare a periilor nu dăunează comutaţiei şi nu provoacă scînteierea periilor.

Se va evita creşterea prea rapidă a rezistenţei regulatorului de excitaţie, adică mişcarea prea rapidă a manetei lui, atunci cînd tensiunea generatorului trebuie scăzută.

Se vor verifica contactele din circuitul înfăşurării derivaţie a regulatorului de tensiune.

Se va dispune pe polii principali ai generatorului înfăşurarea auxiliară serie, care va întări influenţa înfăşurării derivaţiei. Se va bobina pe polii principali ai generatorului cîte o spiră în scurtcircuit din cupru, cu o secţiune suficient de mare, astfel încît rezistenţa spirei să fie cît mai mică.

Generatorul cu excitaţie mixtă şi-a schimbat polaritatea periilor; cauza poate fi lipsa conductorului de egalizare dintre înfăşurările serie ale generatoarelor care funcţionează în paralel.

Se va conecta conductorul de egalizare. Se va magnetiza generatorul din nou de la o sursă oarecare de curent, observîndu-se ca polaritatea să fie corectă.

Se mai poate întîmpla ca prin înfăşurarea în serie a generatorului să treacă un curent de sens invers (de exemplu, la descărcarea unei baterii de acumulatoare).

Se va conecta în circuitul rotorului un întreruptor automat de curent invers. Se va magnetiza din nou generatorul.

Scanned with OKEN Scanner

5.5. FUNCŢIONAREA MOTOARELOR DE CURENT CONTINUU ALIMENTATE DE LA UN SISTEM CU TIRISTOARE

5.5.1. Variaţia turaţiei motorului de curent continuu prin modificarea tensiunii la bornele indusului

Instalaţiile cu tiristoare au numeroase aplicaţii între care variaţia turaţiei motoarelor de curent continuu şi a motoarelor asincrone. Aplicaţiile pentru variaţia turaţiei motoarelor asincrone au perspective deosebit de favorabile, dar pînă în prezent aplicaţiile industriale au rămas relativ limitate. În schimb instalaţiile cu tiristoare au o largă utilizare în toate ramurile industriei pentru variaţia turaţiei motoarelor de curent continuu. Avantajele variaţiei turaţiei cu ajutorul motoarelor de curent continuu alimentate de la o instalaţie cu tiristoare, sînt atît de însemnate, încît reprezintă o soluţie de multe ori mai practică decît celelalte soluţii ca de exemplu utilizarea motoarelor de curent alternativ cu colector.

Modificarea tensiunii la bornele indusului permite să se varieze turaţia pentru o valoare dată a cuplului rezistent. Dacă se variază valoarea medie a tensiunii date de redresorul de la care se alimentează indusul, se realizează deci variaţia turaţiei.

Valoarea medie a tensiunii redresate, depinde de valoarea eficace a tensiunii alternative. Variaţia tensiunii pe partea de curent alternativ necesită un transformator reglabil, deci o soluţie relativ puţin economică.

Redresoarele comandate permit însă, variaţia tensiunii redresate în mod direct, fără a necesita variaţia tensiunii pe partea de curent alternativ.

La început s-au utilizat în acest scop ca redresoare comandate, instalaţii de redresare cu tiratroane (tuburi cu vapori de mercur comandate). Randamentul acestor instalaţii este însă relativ scăzut. Noi posibilităţi au apărut odată cu introducerea în industrie a semiconductoarelor, care au permis să se realizeze redresoare cu randamente superioare şi dimensiuni mici.

5.5.2. Scheme de redresoare cu tiristoare

Există scheme de redresoare monofazate şi trifazate. Cele mai importante sînt cele trifazate, deoarece asigură o formă mai bună tensiunii redresate; de aceea aceste scheme vor fi tratate în continuare.

Redresoarele cu tiristoare se împart în două categorii după cum pot da tensiune redresată de un singur sens sau de amîndouă sensurile.

Redresoarele care dau curent redresat de un singur sens pot fi în punte mixtă (fig. 5.7) sau în punte completă (fig. 5.8). Cele în punte mixtă sînt prevăzute pe jumătate din ramuri cu tiristoare, iar pe jumă-

Scanned with OKEN Scanner

tate din ramuri cu diode redresoare. Cele în punte completă sînt prevăzute pe toate ramurile cu tiristoare.

Puntea redresoare uzuală este de tip Graetz.

Redresorul în punte mixtă este o schemă relativ simplă, cea mai economică şi cea mai utilizată dintre schemele de redresoare care dau

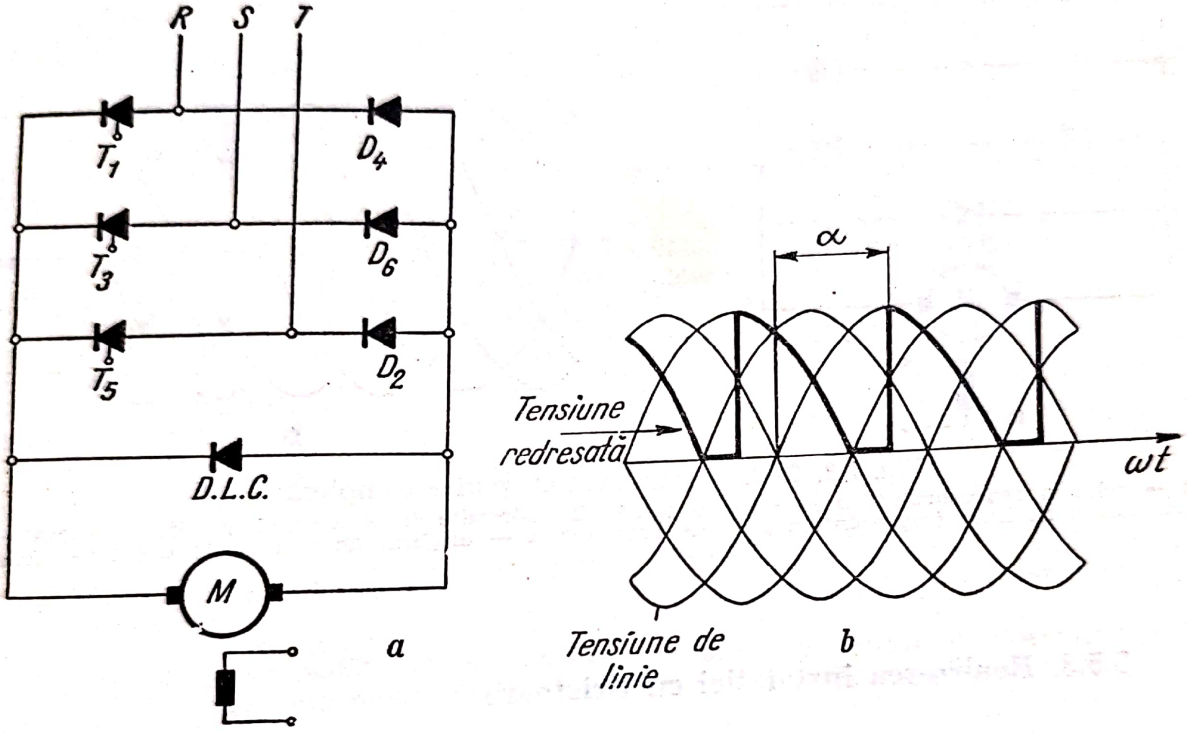


Fig. 5.7. Redresor trifazat cu tiristoare în punte mixtă:
a — schema redresorului; *b* — curba tensiunii redresate reprezentată cu linie groasă şi tensiunile de linie reprezentate cu linie subţire; α — unghiul de aprindere (unghiul de comandă sau unghiul de defazaj al momentului de aprindere faţă de momentul în care tensiunea aplicată tiristorului este nulă); D.L.C. — diodă de liberă circulaţie.

tensiunea redresată de un singur sens. Schema acestui tip de redresor şi curbele tensiunilor sînt reprezentate în fig. 5.7. Această schemă permite variaţia turaţiei motorului într-un singur sens. Sensul de rotaţie se poate schimba, inversînd sensul curentului de excitaţie al motorului.

Redresoarele cu punte mixtă sînt de obicei prevăzute cu diodă de liberă circulaţie (fig. 5.7) care are rolul de a uşura comutarea curentului între diode şi tiristoare.

Redresorul în punte completă este o variantă obţinută prin înlocuirea în puntea mixtă a diodelor redresoare prin tiristoare. Schema acestui tip de redresor şi curbele tensiunilor sînt reprezentate în fig. 5.8. După cum se poate vedea în fig. 5.8, curba tensiunii redresate este mai favorabilă în acest caz, deoarece conţine mai puţine armonici.

Redresoare care pot da tensiune redresată de ambele sensuri, permit să se obțină tensiuni de amîndouă sensurile la bornele indusului și deci permit pentru un anumit sens al curentului de excitație al motorului să se obțină amîndouă sensuri de rotație.

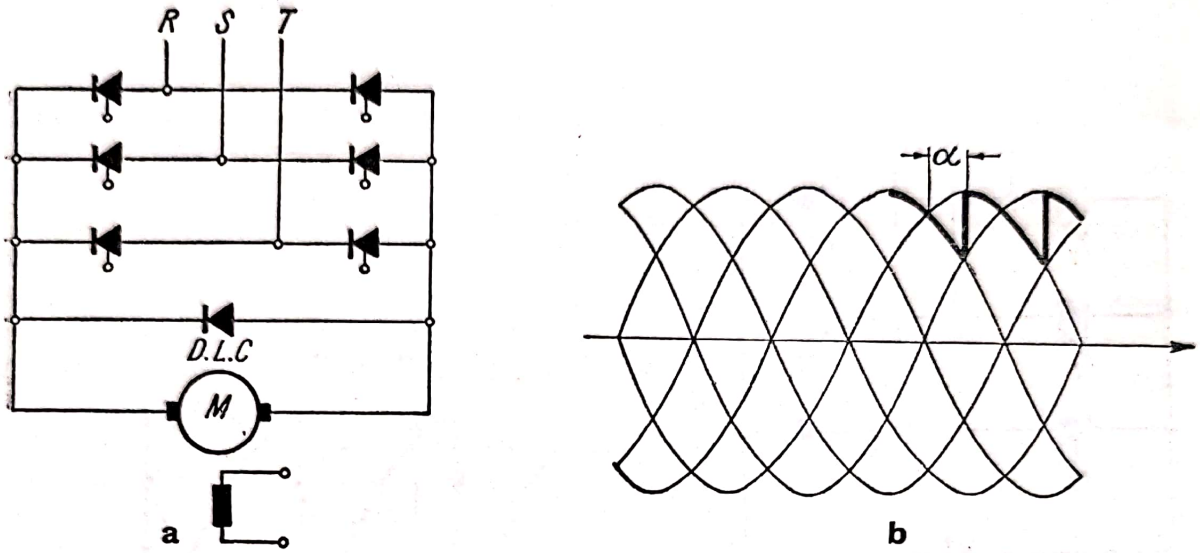


Fig. 5.8. Redresor trifazat cu punte completă:
a — schema redresorului; *b* — curbele tensiunii redresate (reprezentată cu linie groasă) și tensiunilor de linie (reprezentate cu linie subțire); α — unghiul de comandă; *D.L.C.* — diodă de liberă circulație.

5.5.3. Realizarea instalației cu tiristoare

Tiristoarele, ca de altfel semiconductoarele în general sînt sensibile la suprasarcini, supratensiuni, sau la variațiile rapide de tensiune sau de curent, care au loc în primele microsecunde ale aprinderii, de aceea este necesar ca schemele să fie prevăzute cu anumite dispozitive de protecție.

În fig. 5.9 este reprezentată o schemă cu tiristoare pentru alimentarea unui motor de curent continuu cu turația reglabilă. Elementele principale ale instalației cu tiristoare sînt:

R; S; T — fazele rețelei de curent alternativ;
1 . . . 6 — tiristoare, numerotate în ordinea aprinderilor;
L — bobină cu miez de oțel pentru netezirea tensiunii redresate;
F — siguranțe fuzibile ultrarapide;
R; C — grup rezistență-condensator pentru protecția fiecărui tiristor, contra supratensiunilor care se produc mai ales la comutarea curentului de la un tiristor la altul;
PRG — dispozitiv de protecție contra supratensiunilor importante care pot apărea pe linie, de exemplu la deschiderea înfășurării primare a transformatorului de alimentare;

Scanned with OKEN Scanner

Fa — siguranțe fuzibile cu mare putere de rupere;
K — contactor;
Rt — releu termic pentru protecție la suprasarcini;

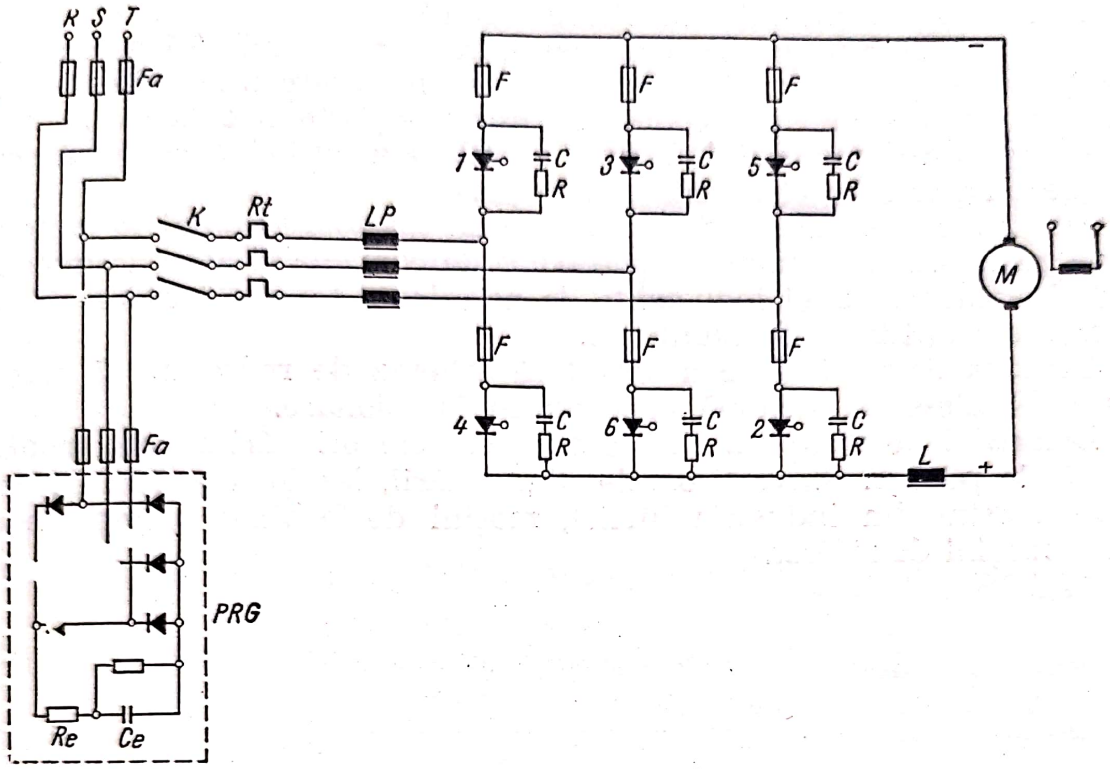


Fig. 5.9. Schema instalației cu tiristoare în punte completă, pentru alimentarea unui motor de curent continuu cu turație reglabilă.

LP — bobine cu miez de oțel saturabil, care limitează variațiile rapide de curent în primele momente (10—20 microsecunde) la începutul trecerii unui curent corespunzător aprinderii unui tiristor.

5.6. CARACTERISTICILE INSTALAȚIILOR DE REGLARE A TURAȚIEI CU TIRISTOARE

Comportarea redresorului. Reglarea turației obținute în regim stabilizat cu sistemul de redresare cu tiristoare, permite să se obțină și să stabilizeze turația cu o abatere de $\pm 0{,}5\%$ într-un raport de 1 la 10, pentru o variație a sarcinii de la 0 la 100% și a tensiunii de alimentare de $\pm 5\%$. Este posibil să se obțină o stabilitate și mai mare, dar atunci sînt necesare anumite instalații speciale.

Singura limitare care există în regim dinamic, este datorită întîrzierii statistice determinată de periodicitatea aprinderilor tiristoarelor care este de 33,3 ms pentru o punte mixtă și 16,6 ms pentru o punte completă.

Scanned with OKEN Scanner

Față de variația turației, realizată prin producerea unei tensiuni continue variabile, cu un generator de curent continuu, instalația cu tiristoare are avantajul unei constante de timp mici. Constanta de timp a unui generator de curent continuu este de aproximativ o secundă, iar la mașinile mari poate fi chiar de cîteva secunde.

Este util de adăugat că deformarea în oarecare măsură a undei tensiunii de alimentare, conduce la o oarecare majorare a factorului de putere, dar acest fenomen este bine cunoscut și poate fi controlat.

Comportarea motorului. Forma ondulată a curbei curentului redresat, face în general mai dificilă comutația.

Utilizarea redresoarelor monofazate cu tiristoare numai la motoarele foarte mici, utilizarea unor scheme trifazate convenabil alese la motoarele mari și adaugarea unei inductanțe de netezire a tensiunii redresate, permit însă condiții bune de comutație.

Practica de exploatare a arătat că schema de redresare și mașinile convenabil alese dau deplină siguranță în funcționare.

Domeniul de utilizare. Dintre numeroasele utilizări se pot menționa acționările pentru: convertizoarele din oțelării, laminoare, linii de tratamente, mașini din industria hîrtiei, mașini de bobinat, pompe, mașini unelte, mașini de ridicat.

Scanned with OKEN Scanner

6. MĂSURI DE REDUCERE A ZGOMOTULUI în exploatarea maşinilor electrice rotative şi a transformatoarelor

6.1. SURSE DE ZGOMOT LA MAŞINILE ELECTRICE ROTATIVE

Zgomotul produs de o maşină electrică rotativă rezultă din suprapunerea mai multor zgomote de natură diferită, după cum urmează:

— zgomotul aerodinamic cauzat de circulaţia forţată a fluidului de răcire (în general aer) în interiorul maşinii;

— zgomotul magnetic, cauzat de oscilaţiile mecanice ale elementelor elastice (tolele statorului şi rotorului) sub acţiunea forţelor pulsatorii de natură magnetică;

— zgomotul în lagărele maşinii electrice şi în special în cazul lagărelor pe rulmenţi;

— zgomotul periilor colectoare cauzat de frecarea periilor de periferia colectorului sau a inelelor de contact, de jocul periilor în portperii etc.

Zgomotul aerodinamic (de ventilaţie) este transmis prin aer şi nu produce efecte supărătoare decît în locul unde a fost instalată maşina. Celelalte zgomote provenite de la vibraţia pieselor mecanice ale maşinii, se pot transmite prin fundaţie, pereţi, ţevi de instalaţie etc., la celelalte părţi ale clădirii. De aceea aceste zgomote se mai numesc într-un cuvînt „zgomotul structural".

6.2. SURSE DE ZGOMOT LA TRANSFORMATOARELE ELECTRICE

Zgomotul transformatoarelor se datoreşte următoarelor cauze:

— magnetostricţiunea circuitului magnetic;

— forţelor de natură magnetică care iau naştere la îmbinările tolelor;

Scanned with OKEN Scanner

— particularitățile constructive ale fixării miezului;

— rezonanța mecanică a cuvei și a altor elemente;

— modul de montare a transformatorului în încăperea unde va funcționa.

Studiile teoretice și experimentale au arătat că magnetostricțiunea constituie sursa principală a producerii zgomotului în transformatoare.

6.3. NIVELUL ZGOMOTULUI

Aprecierea nivelului de zgomot produs de o mașină electrică rotativă sau un transformator, se face în diferite norme sau proiecte de normă, fie cu ajutorul nivelului presiunii acustice la o distanță dată de mașină, fie cu ajutorul nivelului puterii acustice. Măsurarea nivelului presiunii acustice se execută cu un sonometru, iar puterea acustică emisă de mașină se obține prin integrarea intensității acustice pe o suprafață ipotetică ce înconjoară mașina.

În cîmpul liber sau în condiții apropiate de cele ale cîmpului liber, nivelul intensității acustice este egal cu nivelul presiunii acustice în același punct; deci, cunoscîndu-se variația nivelului presiunii acustice pe o suprafață care înconjoară mașina se poate determina nivelul puterii acustice a acelei mașini cu o relație de forma:

$$L_p = L + 20 \log r + 11, \tag{6.1}$$

în care L_p este nivelul de putere acustică, L este nivelul presiunii acustice și r este raza sferei ipotetice pe care se măsoară nivelul presiunii acustice.

Aprecierea zgomotului mașinilor electrice cu ajutorul nivelului presiunii acustice duce la concluzii eronate în cazul măsurătorilor care se fac în spații neamenajate acustic (motoare montate în hale).

La aprecierea zgomotului unei mașini electrice trebuie să se ia în considerație nu nivelul presiunii acustice, ci puterea acustică emisă de mașină, respectiv nivelul acestei puteri, acesta fiind independent de condițiile ambiante și de distanța față de mașină, cu condiția luării în considerare a absorbției atmosferice în domeniul frecvențelor acustice mai înalte.

În privința valorilor de referință a nivelelor acustice, dacă toate normele prevăd aceeași presiune acustică $P_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ N/m² în ceea ce privește puterea acustică de referință se dau mai multe valori. Unele norme prevăd

$$P_0 = 10^{-13} \text{ W}$$

printre care și I.S.O., iar altele recomandă

$$P_0 = 10^{-12} \text{ W}$$

printre care și STAS 7301-65.

Scanned with OKEN Scanner

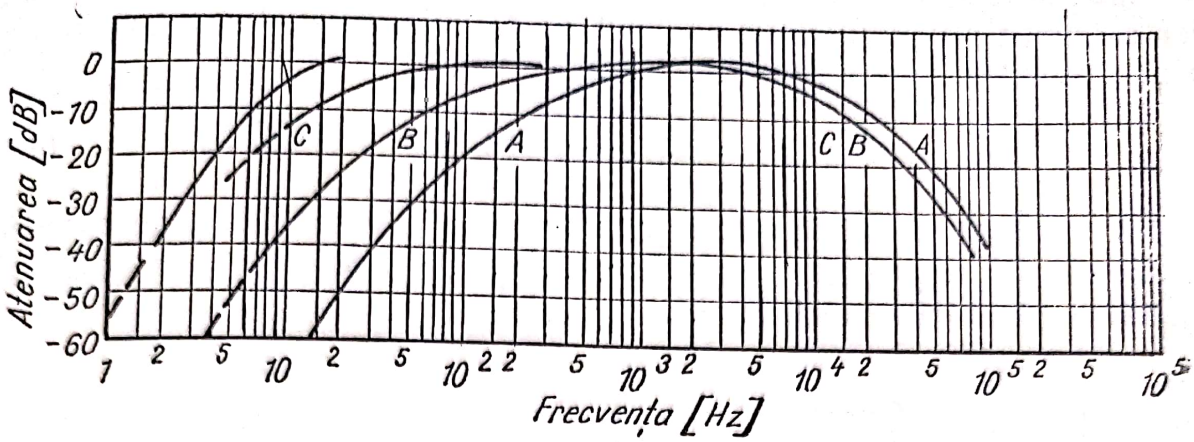


Fig. 6.1. Curbele de pondere ale sonometrelor normalizate.

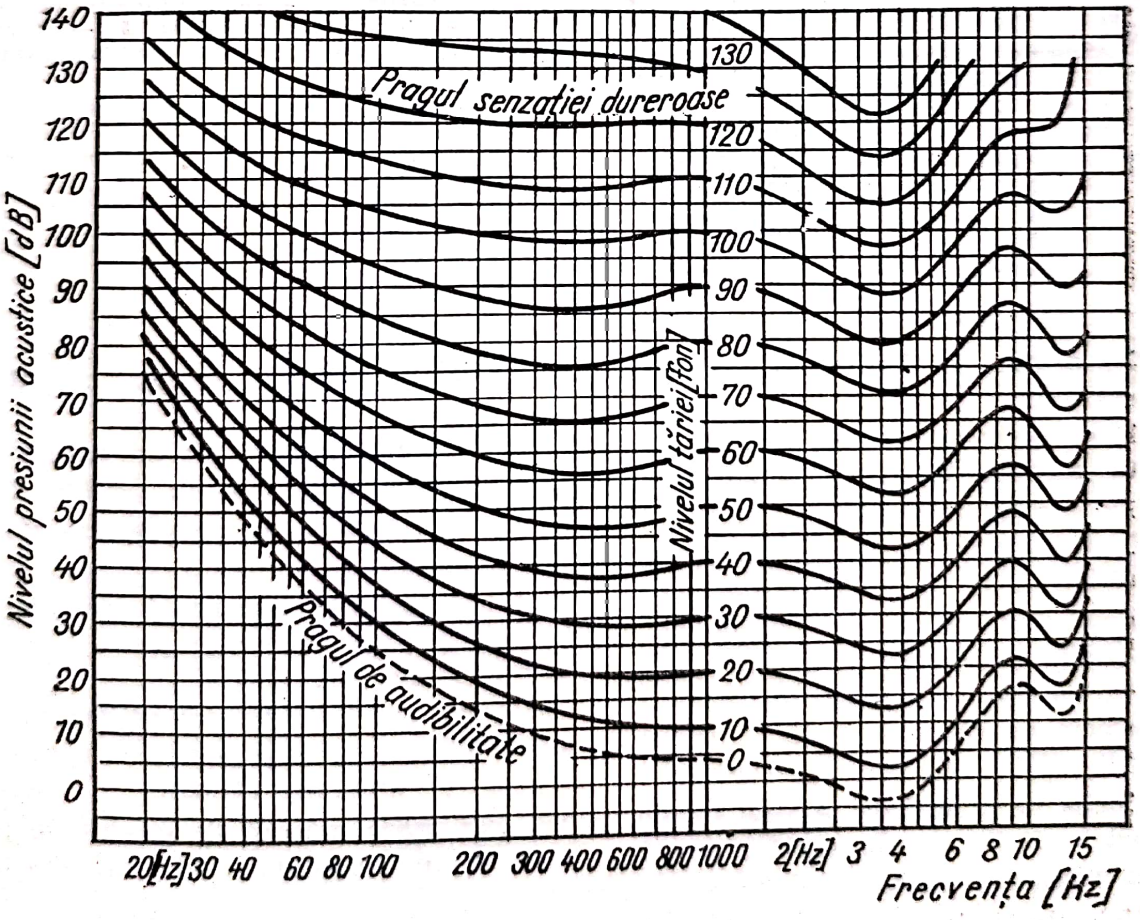


Fig. 6.2. Curbele de nivel al intensității acustice.

Scanned with OKEN Scanner

Lucrîndu-se cu una din aceste valori de referinţă, se poate obţine uşor mărimea nivelului acustic, exprimat în baza celeilalte valori de referinţă, utilizînd relaţia de convertire:

$$L_{P_0=10^{-12}} = L_{P_0=10^{-13}} - 10 \quad [\text{dB}] \tag{6.2}$$

Măsurările industriale se fac cu sonometrul, iar ca filtru de corecţie s-a adoptat de majoritatea normelor, filtrul de pondere *A*. În acest fel rezultatul măsurărilor va fi în dB.

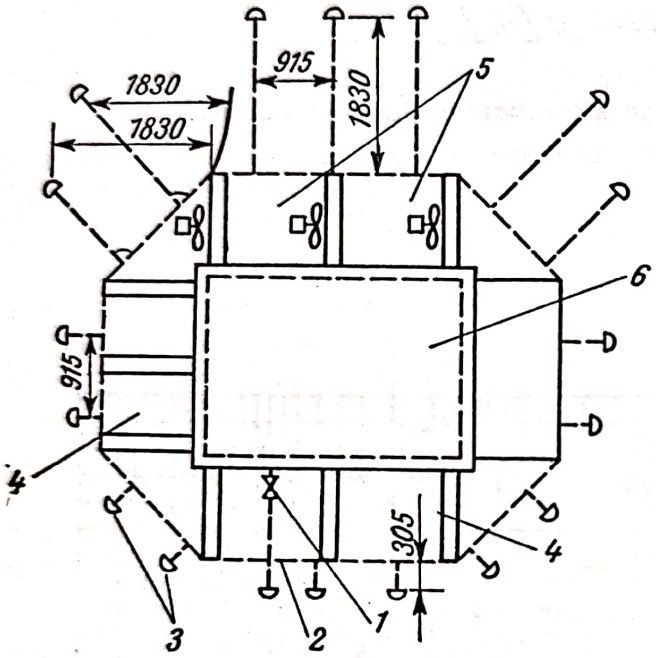


Fig. 6.3. Amplasarea punctelor de măsurat în jurul transformatorului după norma americană:

1 — robinet principal pentru evacuarea uleiului; *2* — suprafaţa de referinţă pentru punctul de măsurare; *3* — puncte de măsurare; *4* — radiatoare cu circulaţie forţată a aerului; *5* — ventilatoare; *6* — cuva transformatorului.

S-a arătat mai înainte că măsurările industriale de zgomot se fac cu ajutorul sonometrului.

Acesta este un aparat portabil, care serveşte la măsurarea într-un anumit loc dintr-un mediu gazos, a nivelului de presiune acustică, exprimat în decibeli (dB).

Sonometrul conform prescripţiei CEI nr. 123 are trei curbe de răspuns numite curbele de corecţie sau de ponderare (A, B, C) fig. 6.1.

Aceste curbe se justifică prin faptul că liniile izosonice (de egală senzaţie auditivă) nu sînt paralele şi pragul de audibilitate pentru frecvenţe joase şi înalte corespunde cu un nivel de presiune acustică ridicat (fig. 6.2).

Pentru studiul zgomotului într-o anumită gamă de frecvenţe se utilizează una din curbele de răspuns *A*, *B*, *C*; valoarea măsurată a presiunii acustice se notează în dB(*A*), dB (*B*) sau dB(*C*) corespunzător filtrului de atenuare utilizat.

Curba de ponderare *A* ţine seama în cea mai mare măsură de gradul de jenă fiziologică şi din aceste motive este adoptată în recomandarea ISO TC 43—1961 pentru măsurarea zgomotului maşinilor electrice.

Valorile limită pentru nivelele de zgomot ale maşinilor electrice rotative au fost propuse prin STAS 7301-65 conform tabelelor 6.1 şi 6.2.

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 6.1

Nivelul puterii acustice maxime admisibile, în dB (A)

Puterea nominală kW (kVA)		Turaţia n, rot/min			
mai mare de	pînă la inclusiv	$n \leq 1\,000$	$1\,000 < n \leq 1\,500$	$1\,500 < n \leq 2\,200$	$2\,200 < n \leq 3\,000$
0,15	1,5	73	77	79	80
1,5	4,0	77	82	84	86
4,0	15	84	88	92	95
15	45	90	95	97	99
45	132	96	103	106	108
132	400	102	108	110*	112*
400	1 000	107*	113*	146*	118*

Tabelul 6.2

Nivelul presiunii acustice la distanţa de 1 m de la carcasa maşinii, în dB (A)

Puterea nominală kW (kVA)		Turaţia n (rot/min)			
mai mare de	pînă la inclusiv	$n \leq 1\,000$	$1\,000 < n \leq 1\,500$	$1\,500 < n \leq 2\,200$	$2\,200 < n \leq 3\,000$
0,15	1,5	64	68	70	71
1,5	4,0	67	72	74	76
4,0	15	74	78	82	85
15	45	80	85	87	89
45	132	85	92	95	97
132	400	90	96	98*	100*
400	1 000	94*	100*	103*	105*

Motoarele de construcţie românească se încadrează în aceste limite (tabelul 6.3).

Metodele de măsurare a zgomotului la transformatoare sînt date numai în normele NEMA (S.U.A.) şi VDE (R.F.G.).

Nivelul zgomotului transformatorului se determină ca o medie a tuturor valorilor măsurate din jurul transformatorului (fig. 6.3).

Valoarea medie se calculează cu relaţia:

$$L = 10 \log \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} L_i / 10. \qquad (6.3)$$

în care L_i este nivelul presiunii acustice în punctul i.

Scanned with OKEN Scanner

Se menționează că relația este valabilă în cazul măsurărilor efectuate în cîmp liber.

În S.U.A., pe baza practicii existente au fost introduse normele privind nivelul maxim admis al zgomotului transformatoarelor uscate și în ulei.

Se dă în tabelul 6.4 un extras din normele NEMA cu valorile maxime admise pentru transformatoarele de putere.

Tabelul 6.3

Limitele pentru nivelul zgomotelor la mașinile electrice de fabricație românească

Puterea, CP	Tip	Turația de sincronism rot/min	Nivelul puterii acustice în benzi de octavă							Nivelul global dB (C)
			75—150	150—300	300—600	1000—1 200	1 200—2 400	2 400—4 800	4 800—10 000	
1,5—2—3	Mașini protejate	3 600	57	65	66	65	62	59	56	71
5—7,5			64	70	73	71	67	64	61	77
10—15			70	77	79	77	73	70	66	83
20—25			76	82	83	81	77	74	69	88
30—40			81	86	89	86	81	78	72	93
50—60			85	89	93	90	85	81	75	97
75—100			86	90	95	92	88	84	78	99
125—150			87	91	99	94	90	86	80	100
1—1,5—2		1 800	61	55	55	57	58	59	51	64
3—5			56	61	61	62	63	61	53	69
7,5—10			63	67	67	67	68	64	57	74
15—20			69	72	72	72	72	67	59	79
25—30			74	76	76	76	76	71	63	83
40—50			78	79	79	79	79	74	66	86
60—75			80	82	82	82	82	77	69	89
100—125			84	84	84	84	84	79	71	91
1,5—2—3	Mașini închise, cu ventilație exterioară	3 600	64	72	81	84	83	76	68	88
5—7,5			68	76	85	87	85	78	71	91
10—15			72	80	90	92	90	83	76	96
20			76	84	95	96	94	88	81	100
25—30			80	88	99	100	98	92	85	104
40—50			83	91	101	102	101	95	88	107
60			86	94	104	104	104	98	90	109
75—100			88	96	106	106	106	100	92	111
1—1,5—2		1 800	55	62	69	69	65	60	53	73
3—5			62	69	76	76	72	66	58	80
7,5—10			68	76	82	82	78	71	64	86
15—20			72	80	87	87	83	74	67	91
25—30			77	85	91	91	87	78	71	95
40—50			81	88	94	94	90	81	74	98
60			83	89	96	96	92	84	77	100
75—100			84	91	98	98	94	86	79	102

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 6.4

Valori maxime admise conform normelor NEMA pentru transformatoare

Tensiunea maximă de încercare la impuls U_i, kV									Nivelul zgomotului dD (A)
$U_i \leq 350$			$450 \leq U_i \leq 650$			$U_i \geq 750$			
Sistemul de răcire*									
1	2	3	1	2	3	1	2	3	
Puterea echivalentă N, MVA									
0,3									56
0,5									58
0,7									60
1,0									62
1,5									63
2,0				—	—	—			64
3,0									65
4,0			1,0						66
5,0			1,5						67
6,0									68
7,5	—		2,0	—	—	—			60
10,0	2,67		3,0	—	—	—			70
12,5	5,33		4,0	—	—	—			71
15,0	6,67		6,0	1,33	—	3,0			72
—	10,0		10,0	2,67	—	4,0			73
20,0	13,33	—	12,5	4,0	—	6,0	—	—	74
25,0	16,67	12,5	15,0	5,33	—	10,0	—	—	75
30,0	20,0	16,67	20,0	13,33	—	12,5	5,30	—	76
40,0	26,67	20,8	25,0	16,67	6,67	15,0	8,0	—	77
50,0	33,33	25,0	30,0	20,0	16,67	20,0	13,33	6,67	78
60,0	40,0	41,67	40,0	26,67	25,0	25,0	16,67	16,67	79
80,0	53,33	50,0	50,0	33,33	33,33	30,0	20,0	20,8	80
100,0	66,67	66,67	60,0	40,0	41,67	40,0	26,67	25,0	81
—	80,0	83,33	80,0	53,33	50,00	50,0	33,33	33,3	82
—	106,67	100,0	100,0	66,57	66,67	60,0	40,0	41,67	83
				80,0	83,33	80,0	53,33	50,0	8
				160,67	100,0	100,0	66,67	66,67	8
				—	—	—	80,0	83,33	86
				—	—	—	106,67	100,0	87

*) 1 — răcire naturală cu ulei; cu ulei și apă; cu apă și circulație forțată a uleiului;
2 — răcire forțată prin suflare cu aer pentru creșterea puterii cu 33%;
3 — răcire forțată prin suflare cu aer și circulație forțată a uleiului cînd se urmărește creșterea puterii transformatorului cu 33% pînă la 67%.

Scanned with OKEN Scanner

6.4. METODE PENTRU REDUCEREA ZGOMOTULUI ÎN EXPLOATARE

6.4.1. Generalităţi

Reducerea zgomotului trebuie să înceapă bineînţeles de la proiectarea maşinii electrice şi transformatorului, ţinînd seama de sursele generatoare de zgomot [77, 78, 81].

La proiectare, reducerea zgomotului se bazează pe un compromis: între cerinţele acustice, posibilităţile tehnice şi efectele economice.

De cele mai multe ori exploatarea cere justificat maşini electrice silenţioase. Dar se produc exagerări în cerere, atunci cînd nu se ţine seama de zgomotul existent la locul exploatării, atunci cînd se ignoră regulile de însumare a nivelelor acustice.

Se va putea considera pentru un anumit loc de muncă un motor fără zgomot, dacă nivelul zgomotului produs de el este cu peste 10 dB sub zgomotul de fond în acel loc de muncă.

Dacă nivelul zgomotului motorului depăşeşte cu 10 dB nivelul zgomotului de fond, atunci se aude numai acest motor şi se consideră zgomotos.

Metodele practice de reducere a zgomotului se aplică atît direct sursei de zgomot (problemă a proiectării), cît şi pentru atenuarea zgomotului produs de maşină, împiedicînd radierea lui în spaţiul înconjurător (problemă de exploatare).

În cazul instalării unui transformator într-o hală de producţie, într-un centru locuit sau în imediata lor apropiere, trebuie să existe preocuparea ca acesta să nu devină sursă de zgomot intolerabilă. Va trebui să se cerceteze care este nivelul acustic admis pentru fiecare loc în parte şi să se ia măsurile necesare pentru menţinerea acestuia în limitele prevăzute. Datele privind limitele maxime admise depind de zona de amplasare a transformatorului (zonă de locuinţe, zonă semi-industrială sau industrială), de mărimea zgomotului de fond, de spectrul zgomotului emis şi de durata emiterii lui.

În cazul transformatoarelor, acestea emit continuu un zgomot cu un spectru care nu variază mult în timp, spectru în care predomină frecvenţe joase.

Pentru a da o imagine mai clară asupra situaţiei zgomotului produs de transformatoare, al căror nivel de zgomot corespunde normelor NEMA, este suficient să se arate că un transformator de 500 kVA trebuie să fie situat la o distanţă mai mare de 12 m pentru a asigura un nivel de zgomot normal într-o cameră cu fereastra deschisă, în timp ce un transformator de 60MVA trebuie să fie situat la minimum 200 m distanţă.

Se menţionează că într-o cameră de locuit, nivelul zgomotului nocturn continuu, pentru a garanta o stare de linişte optimă, nu trebuie să depăşească 25 dB(*A*), preferabil fiind să se coboare la 20 dB(*A*).

Pentru a asigura un nivel de zgomot acceptabil, nu este totdeauna posibilă aşezarea transformatorului la distanţe corespunzătoare şi se im-

Scanned with OKEN Scanner

pune aplicarea de metode adecvate pentru reducerea zgomotului transformatoarelor. Reducerea zgomotului transformatoarelor se poate face fie acționînd direct asupra surselor, fie atenuînd zgomotele produse prin diferite metode.

În paragrafele ce urmează se vor prezenta cîteva metode practice pentru reducerea zgomotului în exploatarea mașinilor electrice rotative și a transformatoarelor.

6.4.2. Reducerea zgomotului în exploatarea mașinilor electrice rotative

Măsuri cu caracter general. În combaterea zgomotului produs de funcționarea mașinilor electrice rotative și transformatoarelor nu se pot aplica soluții tipice; în funcție de specificul fiecărei probleme rezultă și procedeul a cărui aplicare este cea mai potrivită.

În tot cazul, în tehnica de combatere a zgomotului în exploatare se urmărește mărirea rezistenței pe care mediul de transmitere o poate opune undelor acustice.

Energia acustică transportată de unde, suferă în aer atenuări variabile cu distanța. Deci, o soluție ar fi ca sursa de zgomot să fie cît mai departe de receptor, ceea ce se poate lua în considerație numai în unele cazuri.

În majoritatea cazurilor însă, mașinile electrice funcționează în halele de producție sau centrele energetice, receptoarele (muncitorii) fiind în vecinătatea acestor surse de zgomot. Este deci necesar să se obțină o reducere apreciabilă a nivelului zgomotului la receptor.

Acest lucru se poate obține în unele cazuri prin interpunerea în calea undelor a unor obstacole absorbante (ecrane, bariere, pereți, planșee etc.) sau prin construcția specială a încăperii în care sînt montate un grup de utilaje de același fel.

La Uzina de Tractoare din Brașov s-a realizat o hală pentru încercarea motoarelor de tractor cu un zgomot de fond redus, utilizînd o construcție cu pereți fonoabsorbanți și dispuși special pentru a produce amortizarea undelor sonore.

Cum construcții speciale nu se pot realiza decît în cazuri speciale, soluționarea atenuării zgomotului produs de mașinile electrice și agregatele pe care le deservesc rămîne între altele tot folosirea ecranelor și barierelor artificiale în calea undelor acustice.

Se vor expune în cele ce urmează cîteva probleme de care trebuie să se țină seama pentru ca ecranele să aibă eficacitate.

Pentru a se obține valori ridicate ale atenuării, este necesar ca dimensiunile acestor obstacole și bariere să fie multipli ai lungimii de undă propagate, chiar pentru frecvențe perturbatoare scăzute.

Atenuarea realizabilă cu o barieră protectoare depinde de înălțimea ei H, de lungimea de undă λ a sunetului perturbator, de distanța d_s dintre barieră și sursă, de distanța d_r dintre barieră și receptorul de zgomot, cum și de înălțimea față de sol a sursei și a receptorului.

Scanned with OKEN Scanner

În ipoteza că sursa și receptorul se află la aceeași înălțime, atenuarea D realizată cu un ecran avînd lungimea foarte mare în raport cu lungimea de undă a sunetului se deduce cu relația

$$D=10 \log 20X, \tag{6.4}$$

în care factorul adimensional X are valoarea

$$X=\frac{2\left[d_s\sqrt{1+\left(\frac{H}{d_s}\right)^2}-1\right]+d_r\left[\sqrt{1+\left(\frac{H}{d_r}\right)^2}-1\right]}{\lambda\left[1+\left(\frac{H}{2}\right)^2\right]}. \tag{6.5}$$

Făcînd $d_r \gg d_s$ și $d_s \gg H$, relația (6.5) devine

$$X=\frac{H^2}{\lambda d_s}, \tag{6.6}$$

iar atenuarea D se poate determina cu ajutorul diagramei reprezentate în fig. 6.4.

Eficacitatea ecranelor crește cu înălțimea lor și cu reducerea distanțelor dintre perete și sursă sau receptor.

Atenuarea zgomotului cu ajutorul ecranelor protectoare depinde în general și de înălțimile relative dintre sursă și receptor. În fig. 6.5 se dau atenuările pentru diferite poziții relative ale sursei de zgomot S și

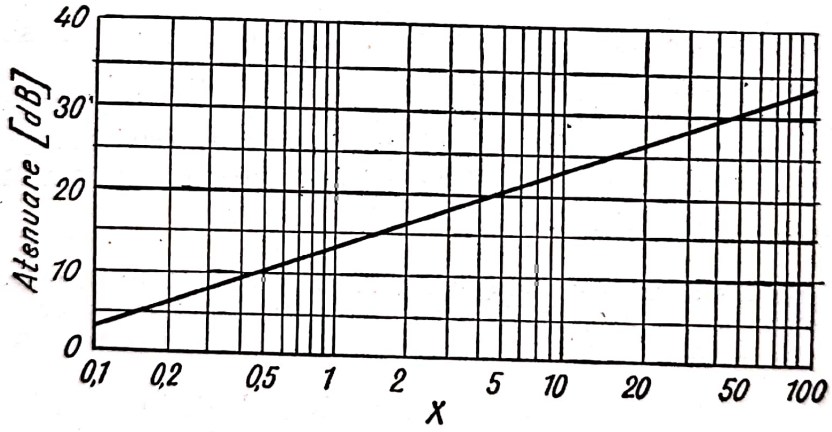


Fig. 6.4. Atenuarea zgomotului datorită ecranelor protectoare în aer liber.

ale receptorului P, în funcție de raportul dintre înălțimea efectivă h și lungimea de undă a sunetului perturbator.

Se recomandă ca barierele să fie construite din materiale care nu lasă să pătrundă sunetul, adică cu masa peretelui mai mare decît 50 kg/m² (un ecran de 1 m² va avea masa de minimum 50 kg).

În fig. 6.6. sînt reprezentate diferitele forme pe care le poate lua ecranul de protecție, funcție de zona care trebuie protejată.

Altă cale de reducere a zgomotului produs de mașini este aceea a utilizării carcaselor și atenuatoarelor. Închiderea completă a unei surse

Scanned with OKEN Scanner

Scanned with OKEN Scanner

într-o carcasă conduce la bune rezultate în ceea ce privește izolarea fonică a sursei respective, dacă un asemenea sistem este corect conceput și proiectat. Prin introducerea sursei într-o carcasă, undele sonore generate se reflectă de pereții acesteia, astfel încît, energia reflectată se

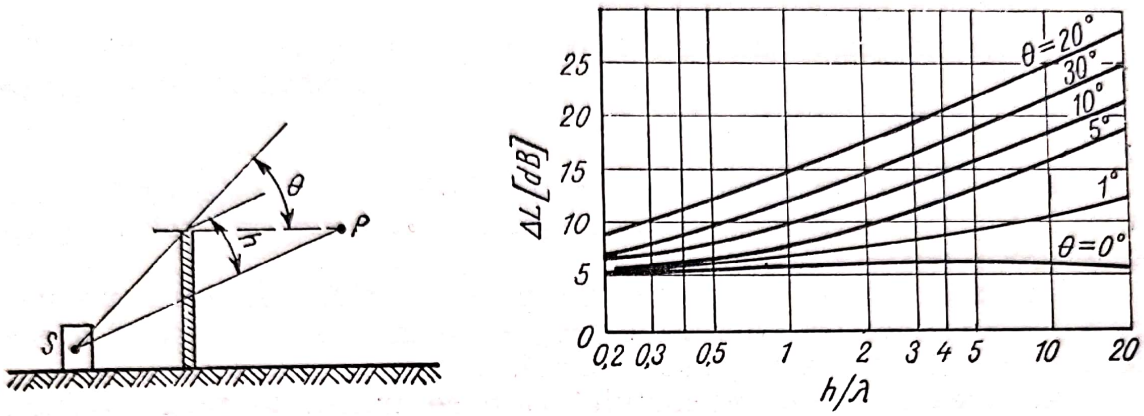


Fig. 6.5. Atenuarea zgomotului datorită ecranelor, în funcție de unghiul umbrei sonore.

suprapune peste energia directă, ducînd la creșterea nivelului de presiune acustică cu o cantitate ΔL. Pe de altă parte, pereții carcasei asigură o atenuare $\Delta L'$. Considerînd nivelul presiunii acustice L_1 a sursei

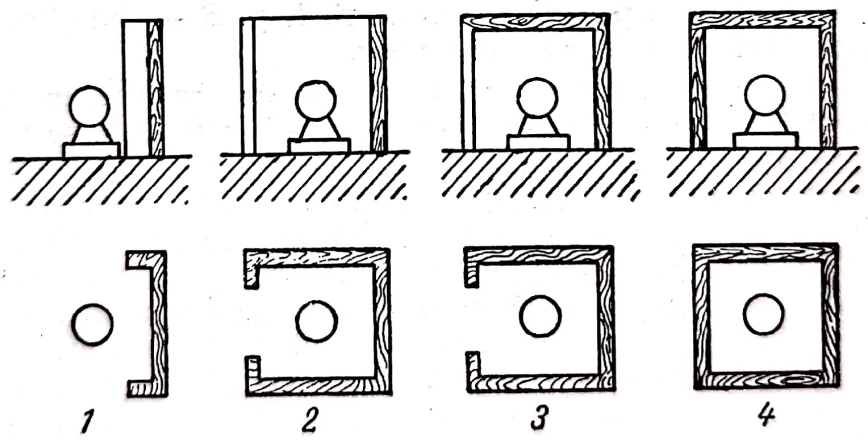


Fig. 6.6. Moduri de ecranizare împotriva propagării zgomotului.

la o distanță determinată în cîmp liber, atunci, după închiderea sursei în carcasă, nivelul de presiune acustică măsurat în același punct este

$$L_2 = L_1 - (\Delta L' - \Delta L). \tag{6.7}$$

Din examinarea relației (6.7) se vede că, în anumite cazuri, carcasa nu are nici un rol ($\Delta L' = \Delta L$), uneori are o eficacitate cu atît mai mare, cu cît diferența $\Delta L' - \Delta L$ este mai mare și, din contră, cînd $\Delta L' - \Delta L < 0$, duce la o amplificare a zgomotului.

Cu alte cuvinte utilizarea carcaselor trebuie să se facă după un studiu prealabil al tuturor elementelor care intervin pentru a realiza o atenuare a zgomotului (coeficientul de absorbție acustică al materialelor din care urmează a se face carcasa, frecvența undelor acustice etc.).

Utilizarea carcaselor este foarte des întîlnită la mașinile electrice mari cu zgomot puternic.

La mașinile cu zgomot de ventilație puternic, în majoritatea cazurilor nu se face o carcasă specială, ci se tratează acustic carcasa proprie a mașinii, folosind atenuatoare speciale pentru căile de circulație a aerului.

Atenuatoarele de zgomot cele mai folosite la căile de ventilație ale mașinilor electrice rotative și ale stațiilor de transformare sînt de tipul cu absorbție sau cu reflexie.

Fiind mai simple, atenuatoarele prin absorbție, la care atenuarea zgomotului se face prin absorbție progresivă în lungul canalului a energiei acustice, sînt utilizate pe scară largă.

Reducerea nivelului zgomotului care se transmite prin conductele de aer se realizează printr-o căptușire a pereților interiori.

Amortizarea zgomotului în canalele de ventilație datorită căptușirii pereților lor se poate aproxima cu relația

$$D = 1{,}1 \ \alpha l \frac{p}{S} \ [\text{dB}] \qquad (6.8)$$

în care D este atenuarea nivelului de zgomot, în dB, α este coeficientul de absorbție acustică a pereților conductei, l, p, S — lungimea, perimetrul, respectiv secțiunea conductei de aer.

Cercetările experimentale arată că atenuarea prezintă un maxim pentru o anumită bandă de frecvență, bandă care la rîndul ei se poate stabili în funcție de dimensiunile transversale ale canalului și de proprietățile fonoabsorbante ale materialelor utilizate. Așa cum se arată în relația (6.8), atenuarea depinzînd de lungimea canalului, îl face ca în multe cazuri să nu poată fi aplicat, dînd complicații la montare. Tot din relația 6.8 rezultă că atenuarea crește, dacă secțiunea canalului scade. Dar aceasta este impusă de asigurarea unui anumit debit de fluid prin canal. O soluție favorabilă se obține prin compartimentarea canalului, montîndu-se în interior unul sau mai mulți pereți despărțitori fie numai verticali, fie și verticali și orizontali (fig. 6.7). În primul caz, se obține un atenuator lamelar, iar în al doilea caz, se realizează un atenuator celular. Pereții despărțitori sînt căptușiți pe ambele fețe cu materiale fonoabsorbante.

Pentru a se executa atenuatoare mai scurte, se pot realiza atenuatoare cu șicane, care prezintă o serie de întoarceri la 180° create prin intermediul unor pereți căptușiți cu materiale fonoabsorbante.

Un asemenea atenuator (fig. 6.8) duce la creșterea rezistenței aerodinamice, de care trebuie să se țină seama la montare, pentru a se asigura debitul necesar răcirii.

Atenuatoarele prin reflexie, la care reducerea nivelului zgomotului este realizată prin reflectarea unei părți din energia acustică incidentă

Scanned with OKEN Scanner

Scanned with OKEN Scanner

într-o porțiune de discontinuitate a canalului, se mai numesc și filtre. Un asemenea atenuator este constituit dintr-o serie de cavități și tubulaturi astfel montate, încît prin discontinuitățile pe care le creează, să realizeze reducerea necesară a nivelului de zgomot.

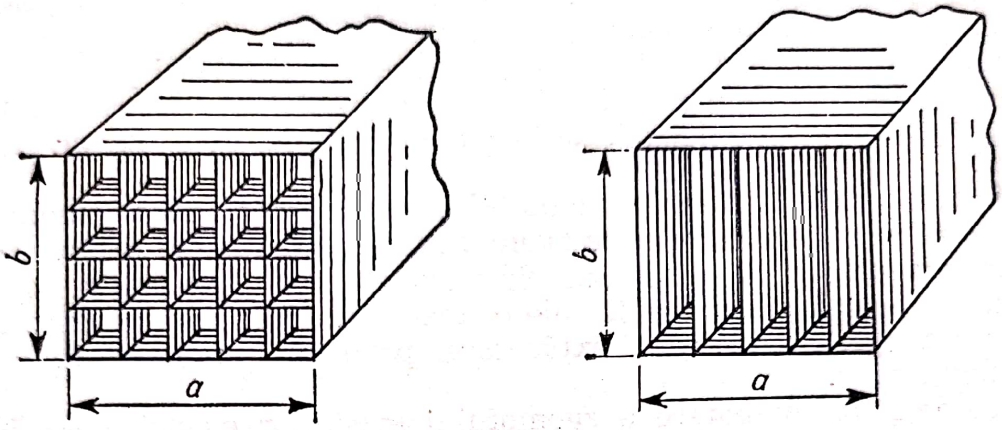


Fig. 6.7. Atenuatoare lamelare și celulare.

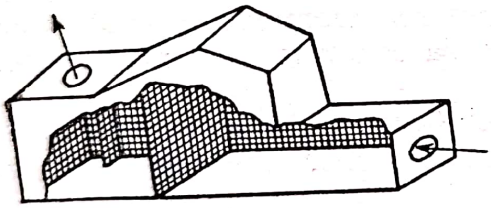


Fig. 6.8. Atenuator cu șicane.

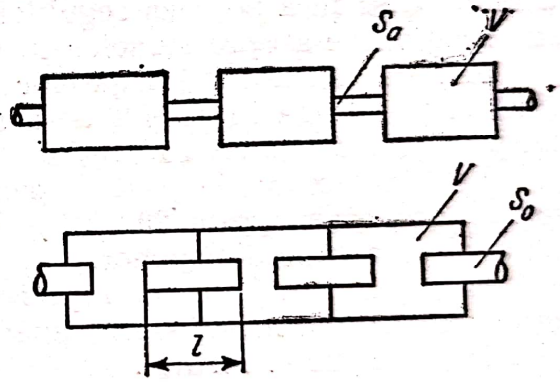


Fig. 6.9. Sisteme de atenuare acustice.

Cel mai simplu atenuator, de tipul filtrului *trece jos*, este alcătuit dintr-o cavitate de secțiune S și de lungime l, prevăzută la capete cu două tuburi, în general de aceeași secțiune S_0. Atenuarea corespunzătoare se poate calcula cu ajutorul relației

$$D=10 \log \left[1+\frac{1}{4}\left(\frac{S}{S_0}-\frac{S_0}{S}\right)^2 \sin^2 kl \right], \qquad (6.9)$$

în care $k=\frac{2\pi}{\lambda}$.

Din această relație rezultă că atenuarea este variabilă cu frecvența, căpătînd prin intermediul funcției sinusoidale, un caracter periodic, repetîndu-se la diferite intervale de frecvență, determinate de lungimea cavității și de viteza sunetului.

Pentru mărirea eficienței, se construiesc atenuatoare formate din mai multe celule, adică mai multe cavități dispuse în serie și cuplate între ele prin tuburi de secțiune redusă. În fig. 6.9 sînt reprezentate cele două moduri în care se pot cupla cavitățile și tuburile.

Trebuie menționat că atenuatoarele pentru o anumită bandă de frecvență se pot realiza numai în urma unor reglaje, calculul, deși foarte laborios, neputînd da soluția constructivă definitivă.

Din multitudinea metodelor de reducere a zgomotului produs de mașinile electrice nu s-au dat aici decît numai cele care se referă la atenuarea zgomotului produs și, dintre acestea, cele care au un caracter general.

Măsuri pentru reducerea zgomotului care se pot aplica asupra mașinilor electrice rotative (sursa de zgomot). Cele patru surse principale care generează zgomote la o mașină electrică rotativă (ventilația, zgomotul aerodinamic, oscilațiile mecanice ale elementelor elastice și zgomotul magnetic) nu pot fi atenuate în exploatare, problema revenind în exclusivitate proiectării.

Metodele de combatere a zgomotului mașinilor electrice au la bază cunoașterea cauzelor zgomotului acestora, a metodelor de măsurare și analiză, a noțiunilor acustice fundamentale.

Aplicarea metodelor de reducere a zgomotului unei mașini electrice trebuie să se facă pe baza regulilor de însumare a nivelelor acustice, încît să se acționeze asupra surselor cu nivel preponderent.

Asupra zgomotului lagărelor și periilor în exploatare se poate influența și acționa în sensul de a menține în permanență nivelul proiectat prin asigurarea unei întrețineri corespunzătoare.

Este interesant de știut că pentru atenuarea zgomotului aerodinamic, la mașinile mari (peste 200 kW) se realizează construcții de mașini electrice cu atenuator de zgomot.

Astfel, în fig. 6.10 este reprezentată schița unui sistem de atenuare a zgomotului de ventilație prin adăugarea de racorduri atenuatoare la aspirația și refularea aerului.

Această preocupare în proiectare pentru realizarea de atenuatoare este explicabilă prin faptul că s-a constatat că, la dublarea puterii mașinii electrice, nivelul mediu al intensității acustice după curba B crește cu circa 5 dB(B) la turație constantă.

În figura 6.11 se redă variația nivelului intensității pentru diferite turații.

În afară de tipul de atenuatoare arătat în fig. 6.10, se întîlnesc o mulțime de alte tipuri de dispozitive de acționare asupra zgomotului aerodinamic. Tendința actuală este de a se obține mașini electrice cu zgomot redus în ceea ce privește lagărele.

Cînd se cere o mașină silențioasă se impune folosirea lagărelor de alunecare, care au nivelul zgomotului mai mic cu cel puțin 15—20 dB față de cazul cînd se utilizează rulmenți.

La mașinile uzuale se utilizează însă în majoritatea cazurilor lagăre cu rulmenți. Pentru realizarea unei mașini cu zgomot redus de rulment

Scanned with OKEN Scanner

(lagăr), o atenţie deosebită trebuie acordată alegerii şi montării corespunzătoare a rulmenţilor. Montarea şi demontarea rulmenţilor se va executa în general la cald, prin încălzire în baie de ulei la 80°C, cu dispozitive speciale de presare sau extracţie şi nu prin batere. Mai indicat este ca încălzirea rulmenţilor în vederea montării să se facă în cuptoare cu aer cald, dacă se dispune de o instalaţie de acest fel.

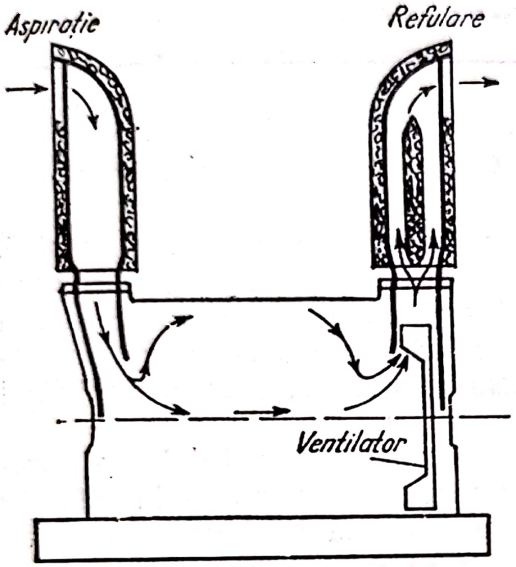


Fig. 6.10. Atenuator pentru zgomotul de ventilaţie a motoarelor mari.

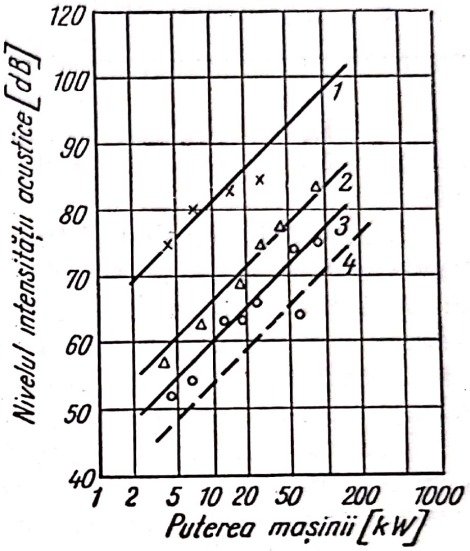


Fig. 6.11. Variaţia intensităţii acustice, pentru diferite turaţii:
1 — 3 000 rot/min; 2 — 1 500 rot/min; 3 — 1 000 rot/min; 4 — 750 rot/min.

La maşinile electrice mai mici (pînă la 20 kW), se poate efectua montarea şi demontarea rulmenţilor la rece, cu folosirea dispozitivelor speciale de presare şi extragere.

Înainte de montarea rulmenţilor se verifică încadrarea în cotele prescrise a fusurilor arborilor precum şi gradul de finisare al suprafeţei acestora (rugozitatea, abaterea de la forma rotundă, excentricitatea fusurilor unul faţă de celălalt etc.).

Se va acorda o deosebită atenţie împiedicării pătrunderii particulelor străine în vaselină sau între căile şi elementele de rulare. Capacele de rulment şi garniturile sale de etanşare trebuie spălate înainte de remontare, apoi bine fixate, pentru a evita pătrunderea prafului şi a altor corpuri străine în interiorul rulmenţilor în timpul exploatării (funcţionării) maşinii electrice.

La apariţia necesităţii înlocuirii rulmenţilor originali, este necesară o alegere corespunzătoare a înlocuitorilor, pentru ca aceştia să fie din aceeaşi clasă de precizie şi de aceleaşi dimensiuni.

Scanned with OKEN Scanner

În România mașinile electrice se construiesc cu rulmenți speciali de precizia P6 conform STAS 4207-65, notați special cu literele EL pentru jocul radial normal.

Pentru joc mai mic decît normal rulmenții se notează cu C_2, iar pentru joc mai mare cu C_3.

Rulmenții pentru mașini electrice vor fi notați astfel:

Clasa de precizie	Joc radial	Simbol
P6	Mai mic ca normal C_2 EL	$P6_2EL$
P6	Normal EL	P6EL
P6	Mai mare ca normal C_3 EL	$P6_3EL$

Zgomotul periilor, fiind un zgomot în special de natură mecanică, poate fi combătut în cazul cînd apare la mașina electrică după un timp de exploatare, prin îmbunătățirea calității suprafeței colectorului sau a inelelor de contact, rodarea periilor, ghidarea fără joc a periilor în portperii, reglarea presiunii resoartelor de apăsarea periilor, eliminarea bătăii colectorului sau inelelor de contact etc.

Un rol esențial în amplificarea sau atenuarea zgomotului îl au portperiile și colierul lor de prindere, care pot intra în rezonanță la diferite oscilații produse la forțele periodice, care acționează în timpul funcționării asupra periilor și de aceea trebuie să li se asigure o revizie periodică minuțioasă, cu atît mai mult cu cît buna lor stare condiționează și buna funcționare a mașinii electrice în general.

Pentru gradul de finisare a colectorului și a inelelor de contact, excentricitatea acestora și jocul dintre perie și locașul său în portperie nu s-au elaborat norme. Se recomandă ca la întreținerea unităților mari să se consulte documentația furnizorului.

Se va evita să se asigure o suprafinisare a colectorului dacă se observă că aceasta a produs o peliculă pe colector sau inelele colectoare, care conduce la mărirea rezistenței de contact.

Se va căuta să se asigure o excentricitate cît mai mică între fusurile de asamblare cu rulmenții sau cu lagărele de alunecare prin strunjirea colectorului sau a inelelor de contact cu ghidarea rotorului în timpul strunjirii pe aceste fusuri și în aceste condiții nu este permisă o excentricitate mai mare de 0,1 mm pentru mașinile mari.

În ce privește jocul periei în portperie se recomandă ca acesta să se realizeze cît mai mic în așa fel ca peria să cadă liber prin portperie sub acțiunea greutății sale.

Măsuri pentru atenuarea zgomotului cu ocazia montajului mașinilor electrice. O sursă importantă de zgomot sînt vibrațiile produse de mașina electrică, vibrații generate de părțile sale în mișcare și care se transmit părților fixe, iar prin intermediul legăturilor dintre mașină și clădire, se transmit mai departe sub formă de unde elastice prin elementele de construcție, generînd zgomot, în afară de celelalte neajunsuri.

Scanned with OKEN Scanner

Prin montarea mașinii electrice pe fundație cu ajutorul unor elemente elastice, se evită în mare parte transmiterea la clădiri a vibrațiilor proprii ale mașinii și ale sistemului de cuplare cu mașina pe care o deservește.

Bineînțeles, cea mai eficientă combatere a zgomotului ca rezultat al vibrațiilor este reducerea la limita inferioară a vibrațiilor mașinilor electrice, prin echilibrarea părților în mișcare și eliminarea excentricităților cauzate de uzura lagărelor.

În ceea ce privește nivelele maxime admise pentru vibrațiile mașinilor electrice, atît pe plan național cît și internațional, acestea nu sînt normalizate.

Pentru mașinile electrice mari, pentru care existența vibrațiilor este foarte periculoasă, cît și pentru mașinile de puteri mari puse să lucreze în situații speciale (în acționarea unor mașini-unelte de precizie), uzinele constructoare au elaborat norme proprii.

Pentru orientarea asupra ordinului de mărime al nivelului de vibrații admis, se dau în tabelul 6.5 valorile maxime admise ale vibrațiilor pentru mașini de puteri cuprinse între 0,5 și 75 kW după proiectul DIN 45665-1964.

Tabelul 6.5

Vibrații maxime admisibile pentru mașini avînd puterea de 0,5 pînă la 75 kW

Treptele de apreciere		Nivelul maxim admis pentru vibrații apreciat prin viteza de vibrație eficace v_{ef} sau viteza echivalentă $v_e = \sqrt{2}\, v_{ef}$, mm/s			
		P, kW		P, kW	
		de la 0,5 la 15		de la 15 la 75	
		v_{ef}	$v_e = \sqrt{2}\, v_{ef}$	v_{ef}	$v_e = \sqrt{2}\, v_{ef}$
Normal		1,8	2,5	2,8	4,0
Cu vibrații reduse	A	0,7	1,0	1,1	1,6
	B	0,45	0,63	0,7	1,0
	C	0,28	0,4	0,45	0,63

S-a arătat anterior, că în exploatare trebuie să se evite montarea mașinilor electrice rotative rigid pe fundație.

Realizarea unui cuplaj elastic între mașina electrică și fundație se realizează prin intermediul unor amortizoare de cauciuc, sau prin intermediul unor amortizoare speciale de tipul denumit vibrașoc.

În fig. 6.12 se dau cîteva din modurile corecte și incorecte de montarea amortizorului de cauciuc, iar în fig. 6.13 se arată două moduri de fixare a unei mașini.

La executarea amortizoarelor de cauciuc, așa cum reiese din figurile 6.12 și 6.13, trebuie să se țină seama de faptul că acesta este puțin compresibil și că întinderea și comprimarea unei bucăți de cauciuc are

Scanned with OKEN Scanner

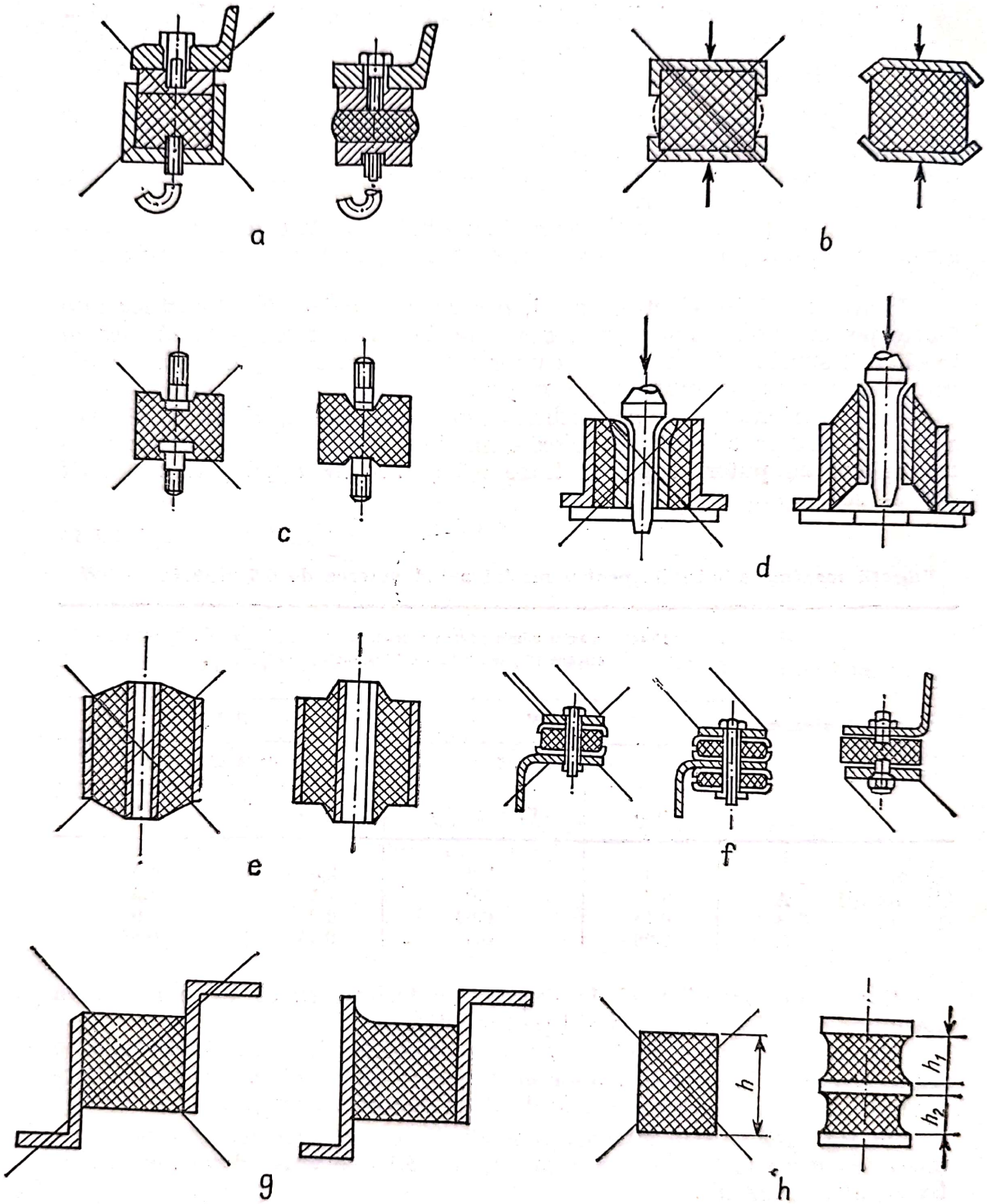


Fig. 6.12. Moduri incorecte și moduri corecte de montare a amortizoarelor din cauciuc.

Scanned with OKEN Scanner

loc numai pe seama deformaţiilor laterale. Din această cauză garniturile de cauciuc trebuie să aibă o formă, care să permită deformarea laterală liberă a cauciucului.

O greşeală răspîndită în practică constă în instalarea agregatelor pe o placă mare de cauciuc, instalaţie care este pe cît de neeconomică pe atît de neeficace.

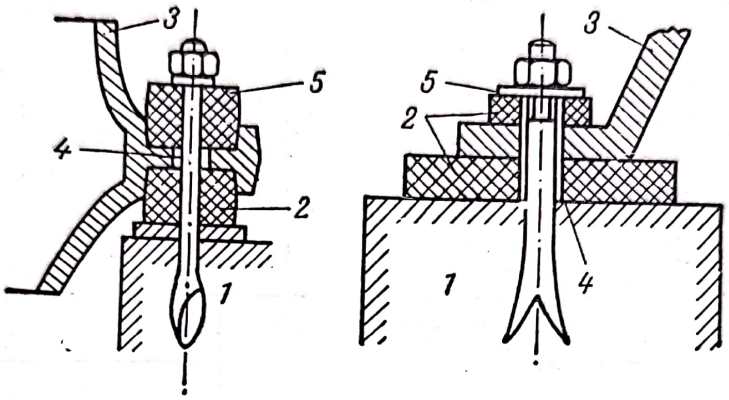


Fig. 6.13. Moduri de fixare a maşinilor cu garnituri elastice:
1 — fundaţie; *2* — cauciuc; *3* — corpul maşinii; *4* — manşon de cauciuc sau strat de aer; *5* — şaibă.

În acest caz, cauciucul se comprimă foarte puţin, deoarece deformarea laterală este îngreunată şi, din această cauză, instalarea agregatelor se deosebeşte prea puţin de o montare rigidă. Se pot folosi plăci mari, dacă acestea sînt prevăzute cu nervuri sau cu găuri (fig. 6.14).

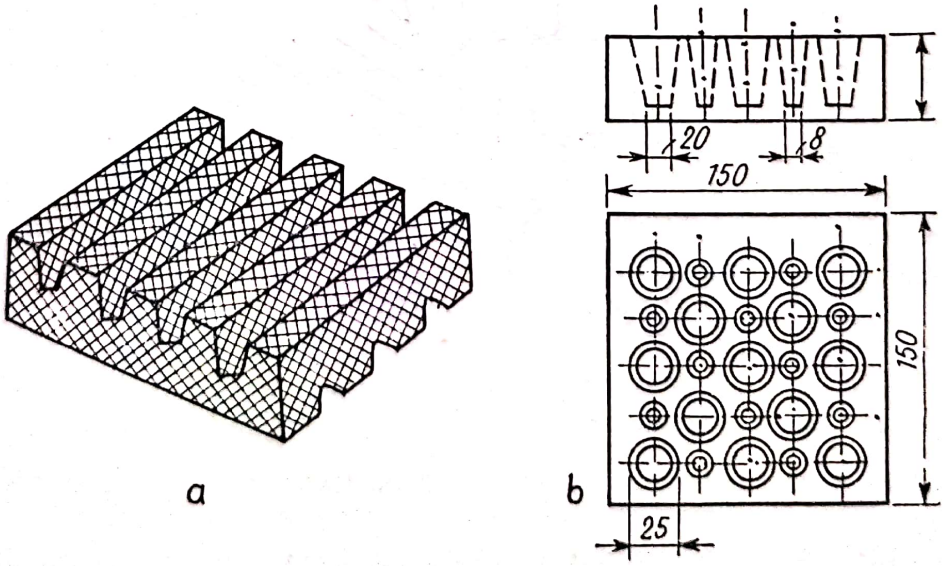


Fig. 6.14. Plăci de cauciuc pentru garnituri:
a — cu nervuri; *b* — cu găuri.

Cele mai noi construcţii amortizatoare de vibraţii sînt aşa-numitele *vibraşoc* (fig. 6.15), prin care se realizează simultan cu o amortizare bună şi o fixare corespunzătoare a maşinii sau agregatului pe fundaţie sau pe pardoseală, fără a mai necesita ancorarea buloanelor în fundaţie sau în pardoseală.

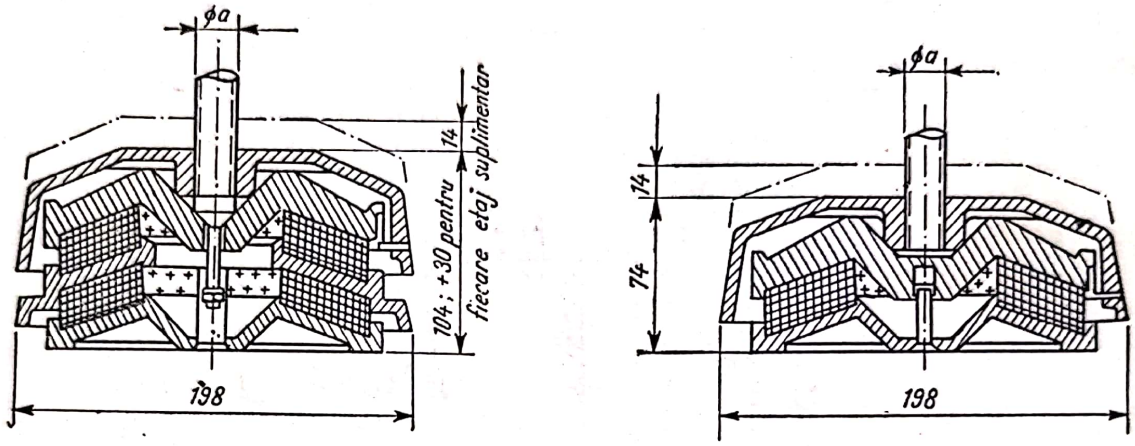


Fig. 6.15. Amartizor de vibraţii tip *vibraşoc*.

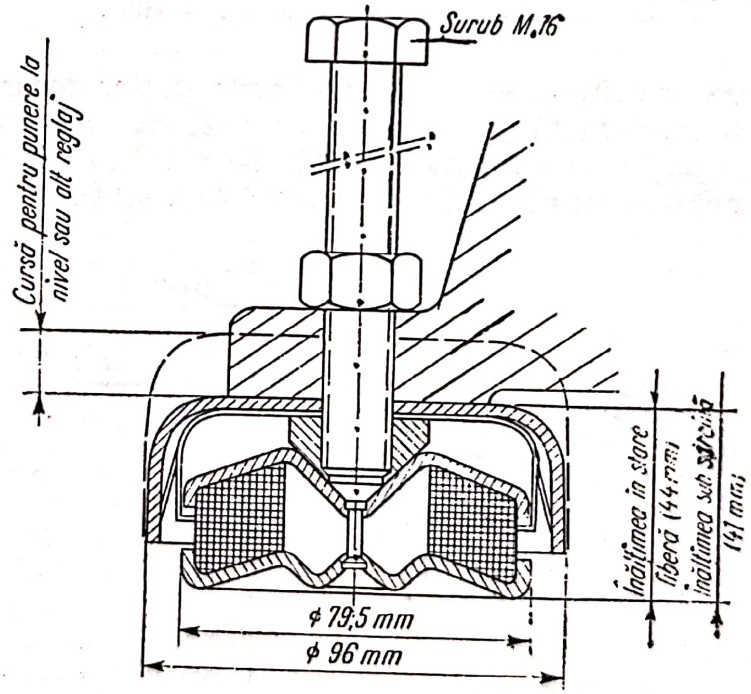


Fig. 6.16. Vibraşoc model V 509; modul de fixare pe talpa motorului.

Aceste vibraşocuri se fabrică într-o gamă largă. Tipul de amortizor se alege în funcţie de greutatea agregatului pe care îl va deservi (tabelul 6.6).

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 6.6

Vibraşocuri

Model	Încărcarea statică, în kg	Model	Încărcarea statică, în kg	Model	Încărcarea statică, n kg
V 402-1	55—135	V 118-0	45— 115	V 509-0	45— 115
V 402-3	135—270	V 118-1	115— 230	V 509-1	115— 230
V 402-5	270—540	V 118-3	230— 450	V 509-3	230— 450
		V 118-5	450— 900	V 509-5	450— 900
		V 318-1	900—1 800	V 519-1	230— 450
		V 318-3	1 800—3 100	V 519-3	450— 900
		V 318-5	3 100—4 500	V 519-5	900—1 800
		V 318-7	4 500—7 000	V 519-7	1 800—3 100

Vibraşocurile tip V 509 şi modul de montare pe talpa motorului sînt reprezentate în fig. 6.16.

În concluzie, cunoscîndu-se interdependenţa dintre zgomot şi vibraţii, o limitare a vibraţiilor duce în mod implicit la o limitare a zgomotului.

Totodată, cunoscîndu-se limitele admise pentru vibraţii, pe baza măsurărilor se vor putea înlătura cauzele care le produc, cauze care se reduc în special la echilibrarea dinamică a ansamblului rotor cu ventilator.

6.4.3. Reducerea zgomotului în exploatarea transformatoarelor

Zgomotul produs de staţiile de transformare sînt mai puţin jenante în cadrul întreprinderilor industriale, întrucît în ansamblu în cadrul industrial alte zgomote sînt primordiale.

Ceea ce jenează este acţiunea zgomotului staţiilor de transformare în perioada de odihnă şi de refacere a forţei de muncă.

Transformatoarele instalate în cartierele locuite sau în apropierea lor, dacă nu s-au luat măsuri de atenuarea zgomotului, contribuie în cea mai mare măsură la mărirea zgomotului de fond în timpul nopţii.

Pentru limitarea zgomotului produs de staţiile de transformare este necesar a se lua măsuri speciale cum sînt amplasarea staţiei de transformare în afara cartierelor locuite, ecranarea artificală şi naturală a staţiei şi intervenţii corespunzătoare privind întreţinerea transformatoarelor din staţii. Măsura cea mai eficace pentru reducerea influenţei zgomotului staţiei de transformare asupra creşterii zgomotului de fond în cartierele de locuinţe, rămîne însă amplasarea acestei staţii în afara zonei de locuinţe.

Bineînţeles, nu întotdeauna este posibil ca amplasarea staţiei de transformare să se facă la o asemenea distanţă de cartierul pe care îl deserveşte sau de hala de producţie (în ultimul timp se obişnuieşte, din motive economice, ca staţia de transformare să fie chiar în hala de pro-

Scanned with OKEN Scanner

ducție, dacă această hală depășește 10 000 m²), ca zgomotul produs fără atenuare să nu jeneze.

În cazul instalării unui transformator într-o hală de producție, într-un centru locuit sau în imediata lor apropiere, trebuie să existe preocuparea ca aceasta să nu devină o sursă de zgomot intolerabil. Va trebui să se cerceteze care este nivelul acustic admis pentru fiecare loc în parte și să se ia măsurile necesare pentru menținerea acestuia în limitele prevăzute. Datele privind limitele maxime admise depind de zona de amplasare a transformatorului (zonă de locuințe, zonă semi-industrială sau industrială), de mărimea zgomotului de fond, de spectrul zgomotului emis și de durata emiterii lui.

Principala sursă de zgomot la transformatoare este magnetostricțiunea, care depinde de inducția și oțelul transformatorului.

Reducerea zgomotului ca urmare a magnetostricțiunii este foarte anevoioasă, fără a se obține efecte substanțiale. De exemplu, pentru a se reduce zgomotul produs de magnetostricțiune cu 10 dB costul transformatorului crește cu 20%.

Deoarece mijloacele de reducere a zgomotului transformatoarelor sînt destul de puține și foarte scumpe, problema atenuării zgomotului rămîne în sarcina exploatării.

Dintre elementele la dispoziția exploatării pentru atenuarea zgomotului transformatoarelor se enumeră următoarele:

— montarea corespunzătoare pentru înlăturarea rezonanței;
— realizarea de încăperi fonoabsorbante;
— realizarea de bariere acustice.

Montarea corespunzătoare se realizează prin utilizarea de amortizoare, care să evite transmiterea vibrației construcției respective.

Nu se poate indica o metodă precisă pentru alegerea tipului de amortizor. Se recomandă însă utilizarea unui cauciuc sintetic cu presiunea specifică admisibilă între 3,5 și 7 bar (aproximativ 3,5 și 7 kgf/cm²), sau o combinație de arcuri și cauciuc. Exploatarea va trebui să verifice ca transformatorul să nu aibă îmbinări rigide cu suprafețele care ar putea radia zgomote. Se va da o atenție deosebită radiatoarelor și țevilor de legătură dintre transformator și radiator, cum și barelor de tensiune pentru a nu intra în rezonanță.

Ultimele cercetări privind atenuarea zgomotului transformatoarelor, au condus la concluzia că unul din procedeele eficiente ar fi îmbrăcarea cuvei transformatorului într-o carcasă fonoabsorbantă.

Radiatoarele și dispozitivele de răcire care sînt în exteriorul cuvei sînt prinse prin elemente elastice de cuva transformatorului. Carcasa fonoabsorbantă are numai legături elastice cu cuva transformatorului, pentru a preîntîmpina transmisia directă a vibrațiilor. Dispozitivele de ridicat și de transport, comutatorul de reglare a tensiunii cum și alte accesorii rămîn pe cuva transformatorului, iar carcasa are prevăzute guri de acces la acestea. Carcasa nu acoperă bornele, iar indicatorul nivelului uleiului se instalează în afara carcasei izolante. Experiența a arătat că asamblarea carcaselor trebuie să se facă în fabrică, pentru transformatoarele cu puteri pînă la 50 MWA, iar pentru puteri mai mari, montarea

Scanned with OKEN Scanner

carcasei se va face la locul de instalare. Toate legăturile flexibile ale cuvei cu carcasa se vor executa în fabrică, rămînînd ca la locul de instalare să se monteze întreaga carcasă şi sistemul de răcire. În felul acesta, prezenţa carcasei complică montajul transformatorului în oarecare măsură.

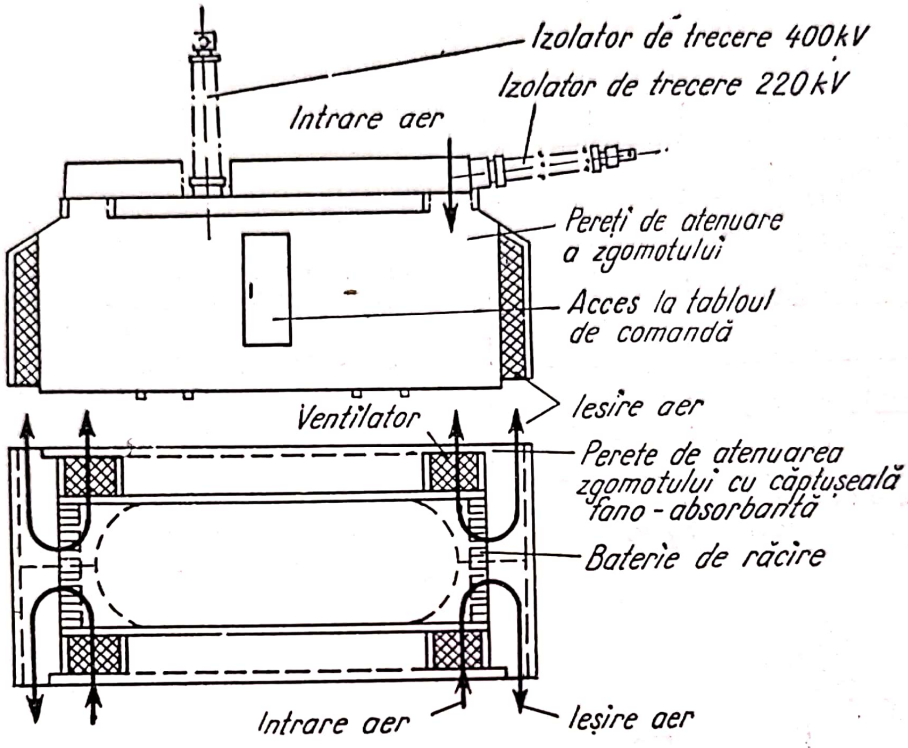


Fig. 6.17. Schema de aşezare a pereţilor fonoabsorbanţi la un transformator monofazat de 333 MVA, 400/220 kV, realizat de firma Siemens.

În anul 1958, firma „General Electric" a instalat la New York cinci transformatoare de 70 MVA, cu carcase de izolare acustică. Nivelul de zgomot al acestor transformatoare a fost redus prin acest procedeu, pînă la valoarea de 50 dB, de la valoarea de 80 dB cît se obţinea în cazul cînd nu exista carcasă de izolare acustică.

Acelaşi procedeu a fost aplicat şi de alte firme, printre care firma „Siemens", În fig. 6.17 este reprezentată schiţa modului de aşezare a pereţilor fonoizolanţi la transformatoare monofazate de 333 MVA, 400/220 kV realizate recent. Montajul pereţilor fonoabsorbanţi se face la locul de montaj al transformatorului şi cuprinde atît cuva, cît şi bateriile de răcire ale transformatorului.

Răcirea forţată este asigurată prin circulaţia uleiului şi suflarea cu aer a bateriilor de răcire. Dacă zgomotul produs de pompe este neglijabil faţă de zgomotul magnetic al transformatorului, zgomotul datorit ventilaţiei are un aport care nu se poate neglija. Cele patru ventilatoare utilizate au o turaţie de 950 rot/min şi asigură fiecare cîte un debit de 4 m^3/s la o diferenţă de presiune de 3,22 bar (33 m H_2O).

Măsurările făcute la un astfel de transformator, conform VDE, au arătat că prin aplicarea pereţilor fonoizolanţi s-au obţinut o atenuare de 12 dB(*A*) cînd nu funcţionau ventilatoarele şi de 16 dB(*A*) cînd erau şi ventilatoarele în funcţiune. Aceste atenuări s-au obţinut pentru distanţa de 5 m de la suprafaţa de radiaţie a transformatorului, în ambele cazuri. În fig. 6.18 este reprezentată variaţia nivelului de zgomot în funcţie de distanţa de la transformator, iar în fig. 6.19 spectrele zgo-

Scanned with OKEN Scanner

motului pentru cele două cazuri, adică cu și fără pereți fonoizolanți. Aceste figuri dau o imagine clară atît asupra proprietăților fonoizolante ale pereților, cît și asupra delimitării zonei perturbate de zgomot.

În cazul montării transformatoarelor în spații libere mari, atenuarea zgomotului în anumite direcții se realizează cu ecrane acustice (figurile 6.4; 6.5 și 6.6).

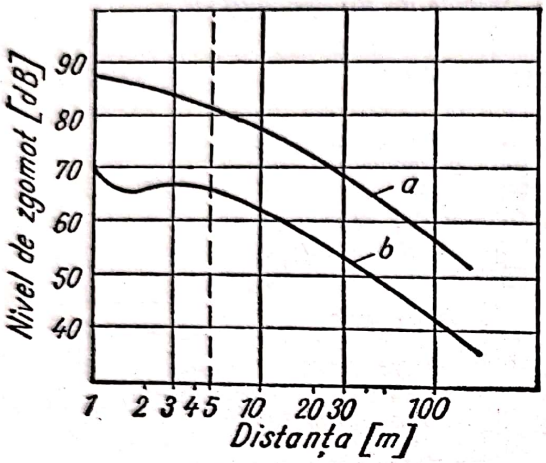


Fig. 6.18. Atenuarea zgomotului în funcție de distanța față de transformator:
a — fără pereți absorbanți; *b* — cu pereți absorbanți.

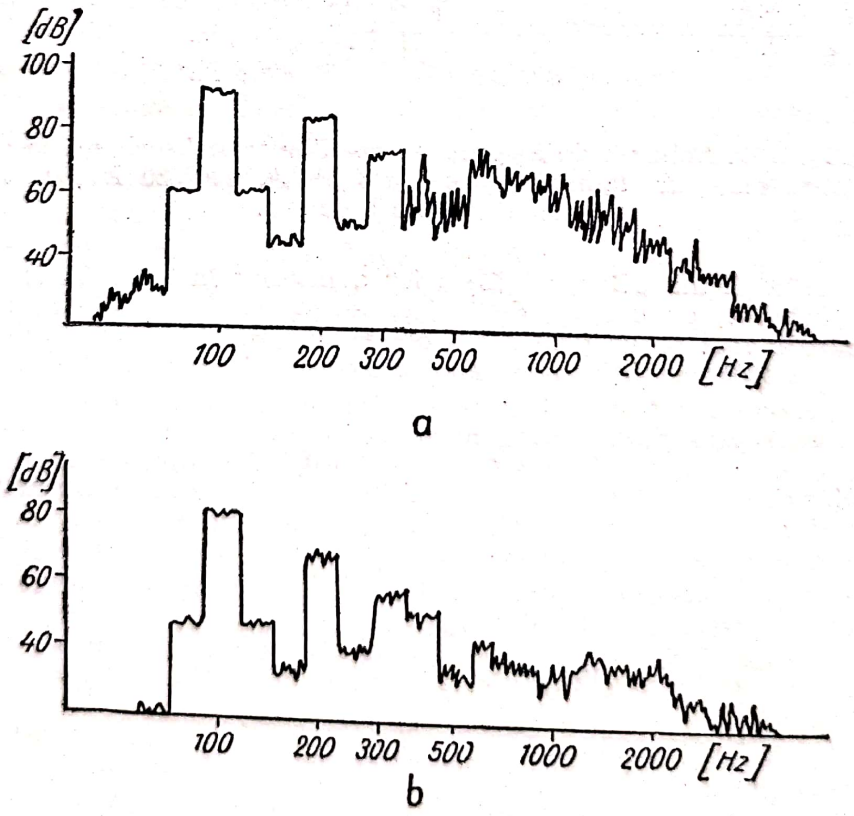


Fig. 6.19. Spectrele zgomotului transformatorului, la distanța de 5 m de suprafața de radiație:
a — fără pereți fonoabsorbanți; *b* — cu pereți fonoabsorbanți.

Scanned with OKEN Scanner

Firma „General Electric" (S.U.A.) a făcut o serie de studii privind ecranările acustice ale transformatoarelor, utilizînd în acest scop o cameră surdă. Pe baza acestor experimentări, s-au stabilit reguli cu caracter general pentru ecranarea acustică a transformatoarelor. Astfel, pentru alegerea înălțimii ecranelor acustice se dau diagramele din fig. 6.20 în care se reprezintă dependența dintre depășirea necesară h_1 a înălțimii peretelui, măsurată de la centrul transformatorului, și distanța r_1 dintre centrul cuvei și ecran, pentru diferitele valori ale atenuărilor, completînd astfel fig. 6.18.

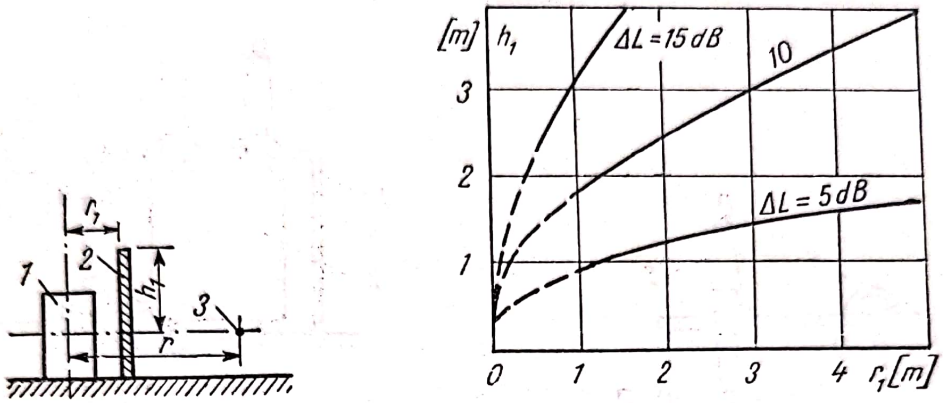


Fig. 6.20. Alegerea înălțimii ecranului în funcție de distanța sa de la centrul cuvei și de atenuarea dorită:
1 — cuva transformatorului; *2* — ecranul; *3* — punctul în care se face măsurarea.

Alegerea numărului ecranelor acustice (pereților) este dictată de condițiile concrete de la locul de montaj. Îngrădirea în formă de L, formată din două ecrane, reduce zgomotul pe o deschidere de 120°, iar cea în formă de *U* pe o deschidere de 180°. Îngrădirea cu patru pereți asigură reducerea zgomotului în toate direcțiile. Pentru micșorarea difracției la partea superioară se recomandă ca aceste ecrane să fie de forma din fig. 6.21.

Ecranarea cu un singur perete, aproape că nu este folosită, din cauza difracției sunetului la marginile ecranului.

Mijlocul cel mai eficient pentru reducerea zgomotului transformatoarelor, îl constituie camerele complet închise cu pereții masivi. Asemenea camere pot atenua zgomotul cu 30—40 dB, dar prezintă mari dificultăți la proiectare și realizare, deoarece se pune problema eliminării pierderilor transformatoarelor, a absorbției sunetelor de către pereții camerei și a execuției ușilor de acces.

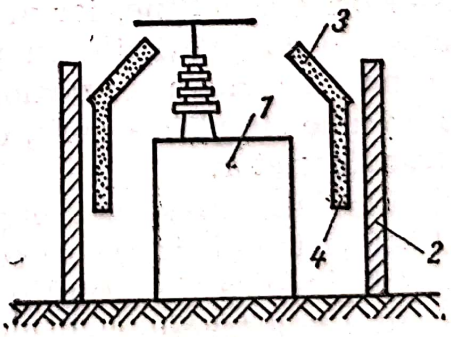


Fig. 6.21. Schema construcției în cazul îngrădirilor cu patru pereți (ecrane):
1 — transformator; *2* — perete din cărămidă; *3* — acoperiș parțial; *4* — perete fonoabsorbant.

În fig. 6.22 sînt reprezentate schiţele unor astfel de celule izolate fonic, de tip greu şi uşor. În cazul încăperilor de tip greu, transformatorul se montează în cameră, respectîndu-se distanţele de izolaţie de la părţile sub tensiune pînă la pereţii şi tavanul camerei, avînd adesea şi izolatoare de trecere suplimentare. Costul unei astfel de camere ajunge la 20—25% din costul transformatorului. Camerele de tip simplificat (fig. 6.22, *b* şi *c*)

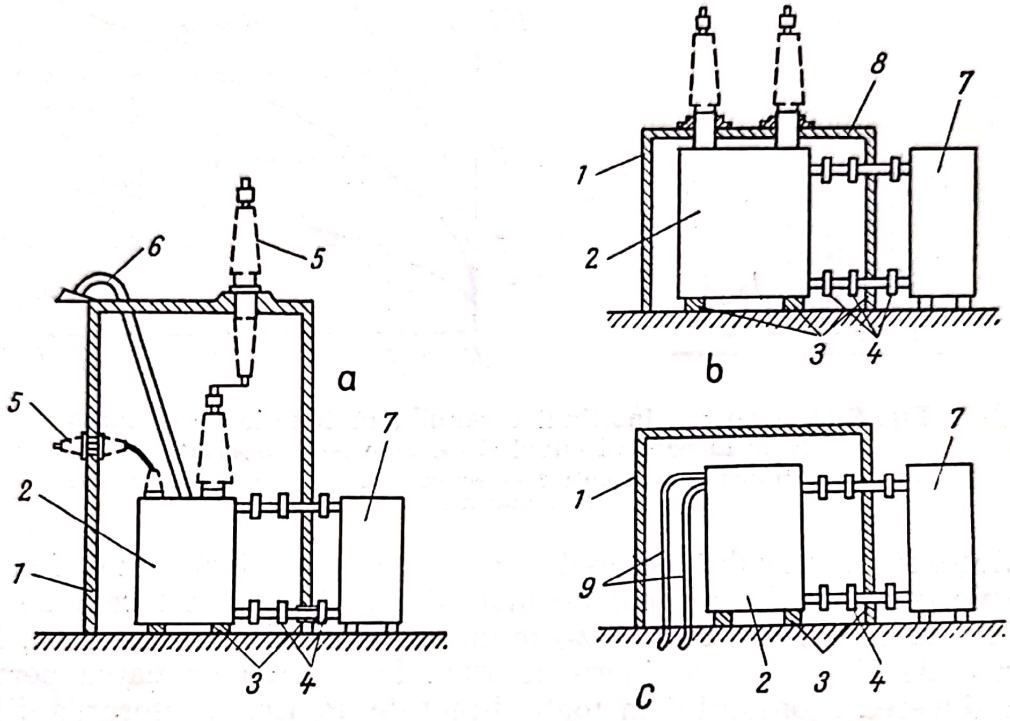


Fig. 6.22. Schiţe de camere (celule) pentru izolarea acustică a transformatoarelor:

a — cameră de tip greu; *b* — cameră de tip simplificat; *c* — cameră de tip greu, dar cu legătură a cablului direct la bornele transformatorului;

1 — pereţii camerei; *2* — cuva transformatorului; *3* — garnituri elastice; *4* — legături flexibile pentru ţevi radiatoare termice; *8* — blocuri de beton demontabile, pentru acoperiş; *9* — cabluri.

sînt de 6—8 ori mai ieftine, iar atenuarea scade la 15—20 dB. În aceste cazuri, camerele au înălţimile cu puţin mai mari decît cuva, iar racordurile trec prin tavanul uşor demontabil al camerei. Construcţia camerelor de tip greu se simplifică mult, dacă cablul de înaltă tensiune se leagă direct la transformator.

Instalaţiile de răcire se pot amplasa fie în exteriorul, fie în interiorul camerei. Dacă sistemul de răcire se montează în exterior, toate ţevile şi alte legături trebuie să fie destul de flexibile, luîndu-se şi măsuri cît mai severe de limitare a transmisiei vibraţiilor. Pompele şi ventilatoarele utilizate trebuie să fie corespunzătoare din punct de vedere vibroacustic şi, totodată, să fie montate corespunzător.

O altă metodă pentru atenuarea zgomotului transformatoarelor este cea a compensărilor acustice. Această metodă se bazează pe interferenţa

Scanned with OKEN Scanner

undelor sonore. În vecinătatea transformatorului se instalează cîteva difuzoare, alimentate cu tensiune care conține frecvența primelor armonici și care predomină în general în zgomotul transformatorului. Poziția difuzoarelor, amplitudinea și faza fiecărei armonici se reglează separat, în funcție de specificul zgomotului, astfel încît sunetele produse de compensator (difuzor) să fie în opoziție de fază cu cele ale transformatorului, în punctul dorit.

Cu această metodă se poate atenua zgomotul cu 20 dB în punctul considerat și cu 6 dB pe o deschidere de 35° pentru fiecare difuzor. Dificultatea introducerii acestei metode, constă în faptul că este necesară o aparatură specială, pentru reglajul automat al compensării în funcție de variația zgomotului transformatorului, ca urmare a variației tensiunii și sarcinii.

Scanned with OKEN Scanner

7. LIMITELE DE ÎNCĂLZIRE ADMISIBILE ale maşinilor electrice rotative şi ale transformatoarelor

7.1. MAŞINI ELECTRICE ROTATIVE

Materialele electroizolante care se folosesc în construcţia maşinilor electrice sînt acelea care stabilesc limitele admisibile ale încălzirii maşinilor electrice rotative.

În România se utilizează un sortiment larg de materiale electroizolante, care admit temperaturi diferite de funcţionare şi, ca urmare, şi încălzirile ce se admit pentru maşinile electrice vor fi diferite.

Se consideră util să se prezinte modul de clasificare a materialelor electroizolante după STAS 6247-60.

În STAS 6247-60 materialele electroizolante sînt clasificate conform caracteristicii lor de bază, şi anume temperatura la care pot funcţiona fără a-şi pierde proprietăţile dielectrice. Această temperatură se numeşte temperatură de stabilitate termică a materialului. În baza acestora se va face prezentarea lor după cum urmează.

Se încadrează în clasa Y, cu o temperatură care caracterizează stabilitatea termică a materialului de 90°C, izolaţiile compuse din bumbac, mătase sau hîrtie, care nu sînt impregnate sau introduse în lichide electroizolante.

În clasa A, pentru care temperatura ce caracterizează stabilitatea termică este de 105°C, se încadrează izolaţiile compuse din bumbac, mătase sau hîrtie, impregnate sau introduse în lichide electroizolante.

La clasa de izolaţie E stabilitatea termică este asigurată pînă la temperatura de 120°C, din această clasă făcînd parte unele pelicule organice sintetice precum şi diferite materiale sau combinaţii de materiale; de asemenea, emailurile pe bază de răşini polivinil-formaldehidice, poliuretanice sau epoxidice, pelicule de triacetat de celuloză, pelicule de tereftalat de polietilenă, fibre de polietilenă, tereftalat etc.

Scanned with OKEN Scanner

Materialele din clasa de izolaţie B, cu stabilitate termică pînă la temperatura de 130°C, sînt materiale pe bază de mică, fibre de sticlă, azbest cu lianţi organici etc.

Clasa F cuprinde materiale pe bază de mică (cu sau fără suport anorganic), fibre şi ţesătură de sticlă, stratificate pe bază de fibre de sticlă şi azbest, avînd ca lianţi răşini şi lacuri alchidice, epoxidice, poliesterice sau răşini silico-organice. Materialele din această clasă prezintă stabilitate termică pînă la temperatura de 155°C.

Materialele pe bază de mică, ţesătură de sticlă, stratificate pe bază de fibre de sticlă şi azbest, utilizînd ca lianţi, lacuri sau răşini siliconice, fac parte din clasa de izolaţie H, care asigură stabilitatea termică pînă la temperatura de 180°C.

Clasa de izolaţie C, din care fac parte mica, sticla şi materialele pe bază de fibre de sticlă, porţelanul, ceramica, cuarţul, (utilizarea lianţilor nu mai este admisă), nu este încă definită, standardele respective indicînd doar că stabilitatea termică este superioară valorii de 180°C.

În funcţie de clasa materialelor electroizolante folosite, s-au stabilit limitele de încălzire pentru înfăşurările maşinilor electrice şi pentru celelalte elemente ale acestora. Aceste limite de încălzire s-au fixat în ipoteza că temperatura agentului gazos care asigură răcirea maşinii nu depăşeşte temperatura de 40°C, iar altitudinea locului de montaj nu depăşeşte 1 000 m.

În tabelul 7.1 sînt cuprinse limitele temperaturilor încălzirilor admisibile ale înfăşurărilor şi altor părţi ale maşinilor electrice în funcţie de clasa de izolaţie după STAS 6247-60.

Temperaturile admise pentru înfăşurările maşinilor electrice sînt mai mici decît cele corespunzătoare materialelor folosite pentru izolarea acestor înfăşurări. Aceasta se explică prin faptul că metodele de măsurare a încălzirilor determină valoarea medie a încălzirii înfăşurărilor. În realitate există însă locuri în care temperatura înfăşurării este mai ridicată faţă de această valoare medie. Deoarece nici în aceste locuri nu trebuie depăşite limitele prescrise pentru materiale electroizolante, limitele admise pentru înfăşurările maşinilor electrice sînt mai scăzute.

Diferenţele între limitele pe care le pot avea temperaturile înfăşurărilor şi temperaturile la care pot funcţiona materialele sînt următoarele:

Clasa A: 5°C;
Clasa B: 5°C;
Clasa E: 10°C;
Clasa F: 15°C;
Clasa H: 15°C.

Limitele supratemperaturilor admisibile la maşinile electrice mai depind de temperatura mediului de răcire şi altitudinea locului de funcţionare.

Prin STAS 1893-65 se precizează următoarele în legătură cu limitele de încălzire în cazul abaterii de la temperatura mediului de răcire de 40°C şi de la altitudinea locului de montaj de 1 000 m.

Scanned with OKEN Scanner

Tabelul 7.1

Clasele de izolaţie

Simbolul clasei de izolaţie	Temperatura care caracterizează stabilitatea termică a materialului din clasa corespunzătoare °C	Lista principalelor grupe de materiale electroizolante care corespund clasei de izolaţie, în ceea ce priveşte stabilitatea termică
Y	90	Izolaţii compuse din bumbac, mătase sau hîrtie fără a fi impregnate sau introduse în lichide electroizolante şi alte materiale sau combinaţii de materiale, dacă experienţa sau încercările au arătat că sînt indicate să funcţioneze la temperatura clasei Y
A	105	Izolaţii compuse din bumbac, mătase sau hîrtie, impregnate sau introduse în lichide electroizolante şi alte materiale sau combinaţii de materiale, dacă experienţa sau încercările au arătat că sînt indicate să funcţioneze la temperatura clasei A
E	120	Unele pelicule organice sintetice precum şi diferite materiale sau combinaţii de materiale, dacă experienţa sau încercările au arătat că sînt indicate să funcţioneze la temperatura clasei E
B	130	Materiale pe bază de mică, fibre de sticlă, azbest cu lianţi organici şi compounduri de impregnare corespunzătoare precum şi alte materiale sau combinaţii de materiale, dacă experienţa sau încercările au arătat că sînt indicate să funcţioneze la temperatura clasei B
F	155	Materiale pe bază de mică, azbest şi fibre de sticlă cu lianţi şi compounduri de impregnare corespunzătoare precum şi alte materiale anorganice sau chiar organice, dacă experienţa sau încercările au arătat că sînt indicate să funcţioneze la temperatura clasei F
H	180	Materiale pe bază de mică, azbest şi fibre de sticlă cu lianţi şi compounduri silico-organice (elastomeri silico-organici) precum şi alte materiale sau combinaţii de materiale, dacă experienţa sau încercările au arătat că sînt indicate să funcţioneze la temperatura clasei H
C	peste 180	Materiale pe bază de mică, porţelan, cuarţ, sticlă cu sau fără lianţi anorganici şi alte materiale sau combinaţii de materiale care în urma experienţei sau încercărilor rezultă că pot fi utilizate la temperaturi superioare clasei H. Temperatura de utilizare a acestor materiale este limitată de caracteristicile lor fizice, chimice şi electrice

Scanned with OKEN Scanner

Dacă la locul de folosire, valoarea maximă a temperaturii agentului de răcire (aer sau alt gaz), la intrare, este mai mică decît +40°C, limitele supratemperaturilor rezultate din tabelul 7.1 pot fi mărite cu diferența între temperatura de +40°C și temperatura agentului de răcire.

Dacă la locul de folosire, valoarea maximă a temperaturii agentului gazos de răcire, la intrare, depășește +40°C cu o anumită valoare, însă este mai mică de +45°C, limitele supratemperaturilor trebuie să fie reduse cu această diferență. Pentru temperaturi ale agentului de răcire mai mari de 45°C, limitele supratemperaturilor se vor stabili de producător.

Temperatura maximă a agentului de răcire (aer sau alt gaz) pentru care este construită mașina, trebuie marcată, pe plăcuția indicatoare a mașinii, dacă este diferită de +40°C.

În cazul utilizării apei ca agent de răcire, în condițiile de temperatură stabilite pentru aceasta (+25°C), limitele temperaturii (încălzirilor) ale diferitelor părți ale mașinii, rezultate din tabelul 7.1, pot fi mărite cu pînă la 10°C.

Dacă temperatura apei de răcire la intrarea în circuitul de răcire este sub +25°C, limitele supratemperaturilor (încălzirilor) diferitelor părți ale mașinii corectate cum s-a arătat, pot fi mărite cu diferența de temperatură dintre +25°C și temperatura apei de răcire.

Dacă temperatura apei de răcire la intrarea ei în circuitul de răcire este mai mare de +25°C, limitele supratemperaturilor (încălzirilor) diferitelor părți ale mașinii corectate cum s-a arătat, trebuie reduse la diferența dintre temperatura apei de răcire și +25°C.

Temperatura apei de răcire trebuie trecută pe plăcuța indicatoare a mașinii, dacă este diferită de +25°C.

Beneficiarul trebuie să asigure la locul de montaj regimul de funcționare precum și accesul aerului sau gazului de răcire.

Dacă răcirea mașinii este împiedicată de montarea ei într-un spațiu prea mic sau de dispozitivul de protecție prevăzut în instalațiile din exploatare (cabină, cușcă etc.), sarcina nominală a mașinii poate fi redusă astfel încît limitele de temperatură ale diferitelor părți conform tabelului 7.1 să nu fie depășite.

În aceste condiții încălzirea diferitelor piese sau subansamble nu trebuie să depășească limitele admisibile indicate în tabelul 7.1.

Pentru mașinile montate la altitudini de peste 1 000 m pînă la 4 000 m deasupra nivelului mării, sînt valabile la încercare, aceleași temperaturi (încălziri) din tabelul 7.1, cu condiția ca această încercare să se efectueze la aceeași altitudine la care mașina urmează să funcționeze în exploatarea normală.

Dacă încercarea are loc la o altitudine mai mică decît aceea a locului de montaj, temperaturile (încălzirile) limită admise, sînt cele din tabelul 7.1, reduse cu cîte 0,5°C pentru fiecare 100 m diferență între altitudinea locului de montaj și altitudinea locului de încercare.

Scanned with OKEN Scanner

Dacă încercarea are loc la o altitudine mai mică decît a locului de montaj temperaturile limită admise indicate în tabelul 7.1, nu se modifică în următoarele situaţii:

— dacă maşina este prevăzută cu răcire forţată cu aer, sau prin alt agent gazos şi dacă presiunea acestui agent de răcire se menţine la o valoare constantă, independent de altitudinea locului de montaj;

— dacă temperatura aerului de răcire nu depăşeşte valorile cuprinse în tabelul 7.2.

În aceste cazuri trebuie menţionată pe plăcuţa indicatoare a maşinii condiţia impusă mediului de răcire.

Tabelul 7.2

Temperatura maximă a aerului de răcire pentru diferite altitudini ale locului de montaj

Altitudinea locului de montaj	Pînă la 1 000 m	Peste 1 000 m pînă la 2 000 m	Peste 2 000 m pînă la 3 000 m	Peste 3 000 m, pînă la 4 000 m
Temperatura maximă a aerului de răcire °C.	40	35	30	25

7.2. TRANSFORMATOARE UZUALE (ÎN ULEI)

Încălzirile maxime admisibile ale elementelor transformatorului în condiţiile conform STAS 1703-67, adică:

— clasa de izolaţie A;

— altitudinea locului de montaj maximum 1 000 m;

— temperatura aerului de răcire maximum +40°C şi minimum —40°C; în cazul răcirii cu apă, temperatura apei la intrare maximum +25°C;

— tensiunea de alimentare practic sinusoidală;

— funcţionarea la puterea garantată şi la tensiunea nominală cu o variaţie în plus de 5—10%, sînt date în tabelul 7.3.

Tabelul 7.3

Încălziri maxime admisibile la transformatoare

Elementele transformatorului	Încălzirea °C	Metoda de măsurare
Înfăşurări (supratemperatura medie)	65	Prin variaţia rezistenţei
Miezul magnetic	75	Cu termometrul
Uleiul (temperatura maximă)	60	Cu termometrul

În cazul cînd temperatura aerului depăşeşte 40°C cu pînă la 5°C, respectiv cu pînă la 10°C, supratempenaturile (încălzirile) admisibile de funcţionare indicate în tabelul 7.3 se reduc cu 5°C respectiv 10°C.

Scanned with OKEN Scanner

Dacă transformatorul este destinat să funcţioneze la o altitudine mai mare de 1 000 m, temperaturile din tabelul 7.3, trebuie să fie reduse în funcţie de altitudinea locului de montaj. Se va ţine seama că transformatoarele încercate la 1 000 m altitudine se vor încălzi în plus la fiecare 100 m altitudine suplimentară cu 0,4% în cazul transformatoarelor cu răcire NL (circulaţia uleiului naturală, răcirea uleiului liberă) şi cu 0,6% în cazul transformatoarelor NS şi FS (circulaţia uleiului naturală, răcirea uleiului prin suflare cu aer, respectiv circulaţia uleiului forţată, răcirea uleiului prin suflare cu aer).

La transformatoarele răcite cu apă nu se face nici o corecţie în funcţie de altitudinea locului de montaj.

Limitele supratemperaturilor admisibile ale maşinilor electrice rotative şi transformatoarelor expuse la paragrafele 7.1 şi 7.2 sînt obligatorii şi sînt valabile în lipsa altor indicaţii speciale.

Întreprinderile constructoare de maşini electrice rotative şi transformatoare, dau în cadrul instrucţiunilor de exploatare indicaţii privind temperaturile diferitelor părţi ale maşinii, admise în timpul exploatării. Depăşirea acestor limite, este un indiciu al apariţiei unui defect.

Scanned with OKEN Scanner

8. INFLUENŢA SUPRASARCINILOR DE SCURTĂ DURATĂ asupra duratei de serviciu a izolaţiei motoarelor

8.1. GENERALITĂŢI

Suprasarcinile de scurtă durată provoacă încălzirea suplimentară a înfăşurărilor maşinilor electrice. Aceste încălziri suplimentare produc o reducere a duratei de serviciu (adică a duratei de viaţă) a maşinii.

Din punct de vedere practic este important de ştiut procentul cu care se scurtează durata de serviciu a izolaţiei, ca rezultat al apariţiei suprasarcinilor de scurtă durată. Deci, este util să se cunoască caracteristica care dă relaţia dintre durata de serviciu şi curentul de suprasarcină. Construirea acestei curbe se face admiţînd ipoteza că izolaţia nu se uzează identic pentru curenţi de suprasarcină diferiţi. De aceea, încălzirea suplimentară va trebui să fie mai mică pentru suprasarcini mici de lungă durată, decît pentru suprasarcini mari de scurtă durată. Uzura izolaţiei la suprasarcini se produce atît în timpul intervalului de încălzire cît şi în timpul intervalului de răcire, deoarece suprasarcina durează un timp relativ scurt, iar timpul de răcire va fi mult mai lung decît timpul de încălzire. Desigur aici se face abstracţie de suprasarcinile foarte mici, cînd aceste intervale de timp sînt de acelaşi ordin de mărime. De asemenea, se va presupune că turaţia variază puţin la suprasarcină, deci poate fi considerată constantă şi de aceea constanta de timp a încălzirii va fi de asemenea presupusă constantă.

8.2. EXPRESIA DURATEI DE SERVICIU A IZOLAŢIEI

S-a stabilit că durata de serviciu a izolaţiei de clasa A poate fi exprimată prin formula

$$B = c\, e^{-b\tau}, \tag{8.1}$$

Scanned with OKEN Scanner

unde b și c sînt coeficienți constanți, iar τ este temperatura. Rezultă că c reprezintă durata de serviciu a izolației pentru $\tau=0$.

Uzura izolației se definește în valoare absolută ca fiind inversul duratei de serviciu,

$$\xi = \frac{1}{B} \tag{8.2}$$

sau, în valoare relativă exprimată în raport cu durata c,

$$\xi_r = \xi_c = e^{b\tau}. \tag{8.3}$$

Uzura izolației pentru un interval de timp cuprins între momentul t_1 și momentul t_2 este deci

$$\xi_c = \frac{c}{B} = \int_{t_1}^{t_2} e^{b\tau}\ dt = e^{b\tau}\ (t_2 - t_1). \tag{8.4}$$

Se va considera acum cazul unei suprasarcini și anume: motorul a fost supraîncărcat cu un curent de multiplu k_1 pentru durata t_1. Temperatura înfășurărilor în decursul existenței suprasarcinii variază conform relației

$$\tau = \tau_n + (k_1^2 - 1)\left(1 - e^{\frac{t}{T}}\right)\theta_n, \tag{8.5}$$

în care, τ_n reprezintă temperatura înfășurării la sarcina normală, T — constanta de timp a înfășurării, θ_n — încălzirea la sarcina de valoare nominală.

Temperatura înfășurărilor pentru intervalul de răcire variază conform relației

$$\tau = \tau_n + \frac{\theta_n\ (k_1^2 - 1)\ t_1}{T}\ e^{-\frac{t}{T}}. \tag{8.6}$$

Dacă se înlocuiește curba de variație exponențială a temperaturii la încălzire, în mod aproximativ, printr-o dreaptă, ceea ce revine la a neglija cedarea de căldură, este necesar să se introducă în loc de $1 - e^{-\frac{t}{\tau}}$ mărimea $\frac{t}{T}$ și relația (8.5) devine

$$\tau = \tau_n + \frac{t}{t_1}\ \Delta\theta, \tag{8.7}$$

în care s-a notat cu $\Delta\theta$ încălzirea suplimentară a înfășurării datorită suprasarcinii care durează pe intervalul de timp t_1,

$$\Delta\theta = \theta_n(k_1^2 - 1)\ \frac{t_1}{T}. \tag{8.8}$$

În mod analog, pentru a simplifica calculele, se înlocuiește curba de răcire exponențială prin două segmente de dreaptă și anume, în intervalul de timp de la t_1 la $t_1+\frac{T}{2}$ se înlocuiește prin dreapta

$$\tau=\tau_n+\frac{T-t}{T}\Delta\theta, \tag{8.9}$$

iar în intervalul de timp de la $t_1+\frac{T}{2}$ la t_1+3T se înlocuiește prin dreapta

$$\tau=\tau_n+\frac{2{,}5\ T-t}{5\ T}\Delta\theta. \tag{8.10}$$

Valoarea relativă a uzurii pe durata încălzirii se poate calcula cu relația (8.4), înlocuind pe τ cu expresia (8.7) și se obține

$$Z_1=\xi_{1c}=(e^{b\Delta\theta}-1)\frac{t_1}{b\Delta\theta}e^{b\tau_n}. \tag{8.11}$$

Valoarea relativă a uzurii pe durata răcirii se poate calcula cu relația (8.4) înlocuind pe τ cu expresiile (8.9) și (8.10) și se obține

$$Z_2=\xi_{2c}=\int_0^{\frac{T}{2}} e^{b\tau_n+b\frac{T-t}{t}\Delta\theta}dt+\int_0^{2{,}5\ T} e^{b\tau_n+b\frac{2{,}5\ T-t}{5\ T}\Delta\theta}dt \tag{8.12}$$

și deci

$$Z_2=\xi_{2c}=(e^{b\Delta\theta}+4\,e^{\frac{1}{2}b\Delta\theta}-5)\frac{T}{b\Delta\theta}e^{b\tau_n}. \tag{8.13}$$

Valoarea relativă uzurii pe toată durata în care se resimte efectul suprasarcinii, adică atît în intervalul de timp cît se produce încălzirea cît și după încetarea sarcinii cît timp temperatura înfășurării rămîne mare, adică în intervalul de timp cît se produce răcirea, este suma uzurilor date de relațiile (8.11) și (8.13)

$$\xi_c=\left[4e^{\frac{1}{2}b\Delta\theta}+\left(1+\frac{t_1}{T}\right)e^{b\Delta\theta}-\frac{t_1}{T}-5\right]\frac{T}{b\Delta\theta}e^{b\tau_n}. \tag{8.14}$$

Înlocuind în ultima relație expresia (8.8) se obține

$$\xi_c=\left[4e^{\frac{1}{2}(k_1^2-1)b\theta_n\frac{t_1}{T}}+\left(1+\frac{t_1}{T}\right)e^{(k_1^2-1)b\theta_n\frac{t_1}{T}}-\frac{t_1}{T}-5\right]\cdot \tag{8.15}$$

$$\cdot\frac{T}{b(k_1^2-1)\theta_n}\cdot\frac{T}{t_1}e^{b\tau_n}.$$

Datele din literatură indică pentru coeficientul b valoarea 0,088. Aceasta corespunde cu o reducere la jumătate a duratei de serviciu a izo-

Scanned with OKEN Scanner

laţiei, dacă temperatura de utilizare a izolaţiei creşte cu 8°C. Valorile indicate pentru coeficientul c nu sînt însă prea exacte şi diferă de la un autor la altul; se poate însă admite $c=1{,}5\cdot10^4$ ani.

Pentru a preciza ordinul de mărime al rezultatelor, se va considera cazul cînd motorul a funcţionat înainte de apariţia suprasarcinii la sarcină nominală, la temperatura aerului de răcire de 35°C şi încălzirea $\theta_n=60$°C, deci temperatura $\tau=95$°C. Se va presupune suprasarcina cu multiplul $k_1=5$ şi durata $t_1=10$ s. În acest caz expresia (8.15) a uzurii relative devine

$$Z=\xi_c=\left[4\,e^{633\frac{1}{T}}+\left(1+\frac{10}{T}\right)e^{1266\frac{1}{T}}-\frac{10}{T}-5\right]3{,}3\,T^2\,, \qquad (8.16)$$

unde ca şi mai înainte T reprezintă constanta de timp a încălzirii înfăşurării, dată de relaţia

$$T=\frac{150\,\theta_n}{k_R\,J_{sn}^2},$$

în care s-a notat k_R — un coeficient prin care se ţine seama de creşterea rezistenţei datorită efectului de refulare a curentului, cînd înfăşurarea este parcursă de un curent alternativ; J_{sn} — valoare nominală a densităţii de curent.

În general, pentru înfăşurarea statorului se poate adopta $k_R=1$. Pentru înfăşurarea rotorului maşinilor asincrone, în caz de suprasarcini care nu produc o micşorare a turaţiei cu mai mult de 10—20%, se poate adopta de asemenea $k_R=1$. Dacă însă turaţia rotorului scade mult, atunci frecvenţa se măreşte şi efectul de refulare a curentului poate deveni important, deci creşte rezistenţa. La scăderea mare a turaţiei, se poate ajunge chiar la valoarea $k_R=3$.

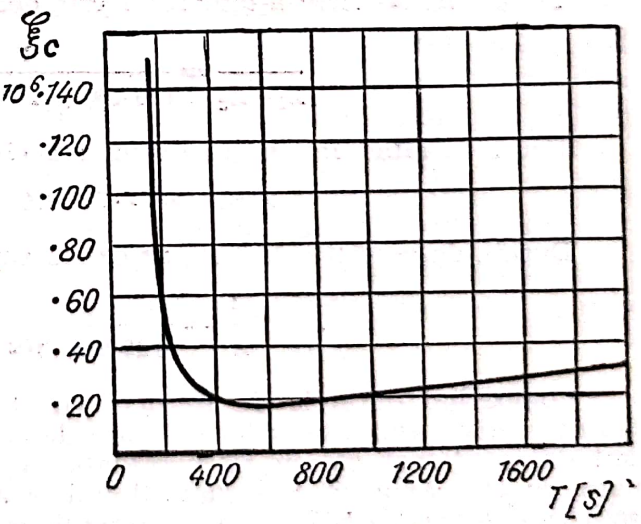


Fig. 8.1. Dependenţa uzurii izolaţiei de constanta de timp a încălzirii înfăşurării, pentru un curent de suprasarcină.

În fig. 8.1 este reprezentată după lucrarea [2] curba $\xi c=f(T)$ care arată dependenţa valorii relative a uzurii izolaţiei de constanta de timp a încălzirii pentru datele $k_1=\frac{I_{suprasarcină}}{I_n}=5$ şi $t_1=10$ s. Din examinarea acestei curbe rezultă că uzura minimă a izolaţiei se realizează pentru înfăşurările cu constanta de timp $T=700$ s. Pentru înfăşurările la care constanta de timp este mică, $T<300$ s, uzura creşte brusc.

Scanned with OKEN Scanner

De exemplu, pentru densitatea de curent $J_{sn}=5$ A/mm² și încălzirea în regim nominal $\vartheta_n=60°C$, constanta de timp a înfășurării statorice este

$$T_{st}=\frac{150\cdot 60}{52}=360 \text{ s},$$

deci este apropiată de valoarea optimă.

Pentru a preciza efectul suprasarcinilor se va considera și următorul exemplu.

Se va presupune că un motor electric cu constanta de timp a încălzirii înfășurării $T=175$ s este supus la suprasarcini o singură dată pe zi, iar suprasarcina este caracterizată prin

$$\frac{I}{I_n}=k_1=5 \text{ și } t_1=10 \text{ s}.$$

În acest caz se obține cu relația (8.16) valoarea relativă a uzurii suplimentare datorite suprasarcinii pe zi,

$$Z=165\cdot 10^6$$

sau pe an

$$Z_1=165\cdot 10^6\cdot 360=59\,400\cdot 10^6.$$

Valoarea relativă a uzurii pentru restul anului este determinată de temperatura de lucru a înfășurării la regim nominal $\tau=95°C$; cu relația (8.4) se obține

$$Z_2=e^{0{,}088.95\Delta t},$$

iar intervalul de timp se determină scăzînd din numărul de secunde din 24 ore, adică 86 400 secunde, durata suprasarcinii $t_1=10$ s și durata de răcire $3T=3\cdot 175=525$ s. Deci,

$$Z_2=e^{0{,}088.95\cdot 360\cdot 85\,865}=128\,000\cdot 10^6.$$

Durata de serviciu a motorului este deci

$$\frac{1}{Z_1+Z_2}=\frac{1}{(59\,400+128\,000)\cdot 10^6}=5{,}32\cdot 10^{-12}.$$

Uzura izolației în decurs de un an, cînd nu ar exista suprasarcini, este

$$Z=e^{0{,}088.95\cdot 360\cdot 24\cdot 3\,600}=129\,500\cdot 10^6.$$

Durata de serviciu cînd nu ar exista suprasarcini este

$$\frac{1}{Z}=\frac{1}{129\,500\cdot 10^6}=7{,}72\cdot 10^{-12}.$$

Comparînd duratele de serviciu cu și fără suprasarcini, rezultă că existența suprasarcinilor amintite reduce durata de serviciu a izolației cu 28,5%. Este interesant de menționat că, cu cît constanta de timp a înfășurării motorului este mai mare, cu atît scade efectul suprasarcinilor asupra duratei de serviciu a motorului. De exemplu, la $T=800$ s, toate celelalte condiții fiind aceleași, reducerea duratei de serviciu ar fi de numai 3%.

Scanned with OKEN Scanner

9. CURENŢII ELECTRICI CARE APAR în lagărele maşinilor electrice rotative

9.1. GENERALITĂŢI

În maşinile electrice, şi în special în maşinile de curent continuu mari, se produc deseori curenţi electrici care pot avea diferite intensităţi şi care trec prin arbore, lagăre şi carcasă. Aceşti curenţi, care în general sînt continui în maşinile de curent continuu şi alternativi în maşinile de curent alternativ, sînt produşi de tensiunea magnetomotoare a circuitelor electrice care înlănţuie arborele, iar arborele se comportă în acest caz ca un disc conducător care se roteşte într-un cîmp magnetic paralel cu axul. Curenţii din lagăre pot atinge uneori valori însemnate, conducînd la distrugerea lagărelor sau la încălzirea lor exagerată şi în acest fel le reduce durata de funcţionare.

Avînd în vedere că intensitatea curenţilor din lagăre poate fi mult mai mare la maşinile de curent continuu decît la maşinile de curent alternativ, se va studia în special producerea acestor curenţi la maşina de curent continuu şi se vor examina problemele mai importante la maşinile de curent alternativ.

9.2. CURENŢII ELECTRICI DIN LAGĂRELE MAŞINII DE CURENT CONTINUU PRODUŞI DE CURENŢII ELECTRICI CARE FORMEAZĂ SPIRE ÎNCHISE ÎN JURUL ARBORELUI

În fig. 9.1 este reprezentat în mod simplificat, circuitul magnetic arbore-palier-carcasă al unei maşini de curent continuu, în care s-a presupus că există un circuit electric care înlănţuie arborele şi produce un cîmp magnetic, ale cărui linii se închid în lungul arborelui şi carcasei

Scanned with OKEN Scanner

și traversează lagărele (care reprezintă două reluctanțe R_{m1} și R_{m2} ale circuitului magnetic). Avînd în vedere spațiile de aer care există în lagăre, cînd acestea sînt lagăre de rostogolire, sau spațiul ocupat de materialul nemagnetic al cuzineților în cazul lagărelor de alunecare, urmează că reluctanțele celorlalte porțiuni ale circuitului magnetic prin care se închid liniile de cîmp sînt neglijabile față de reluctanța corespunzătoare lagărelor.

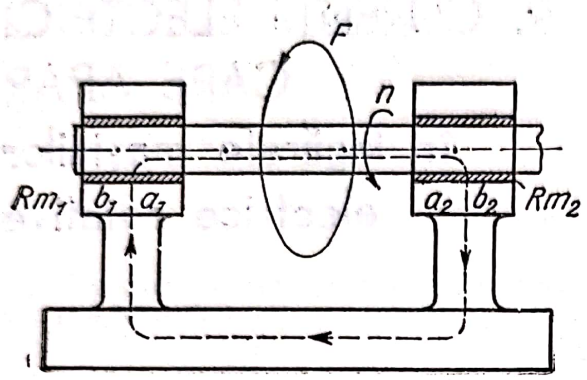


Fig. 9.1. Producerea curenților electrici în lagărele unei mașini de curent continuu.

Inducția magnetică din lagăre, va scădea liniar de la a_1 spre b_1 și de la a_2 spre b_2 (fig. 9.1).

Fiecare secțiune dreaptă a arborelui reprezintă un disc conductor care se rotește într-un cîmp magnetic perpendicular la suprafața discului. Se induce astfel o tensiune electromotoare continuă între centrul arborelui și oricare punct al discului. Aceste tensiuni electromotoare pot produce în anumite condiții curenți electrici, de asemenea continui în arbore, lagăre și batiu.

Tensiunea electromotoare indusă între punctele O_1 și P este

$$U_{e\,OP} = \int \overline{E} \cdot d\overline{l},$$

unde $\overline{E} = \overline{v} \cdot \overline{B}$, deoarece $\overline{B}$ este dirijat axial, iar $\overline{v}$ perpendicular pe rază, $\overline{E}$ este radial (fig. 9.2).

După cum se vede din fig. 9.2, liniile de cîmp magnetic se închid prin lagăre și de aceea inducția magnetică scade de la a_1 spre b_1. Fluxul magnetic variază de la o secțiune transversală a arborelui la alta și de aceea tensiunea electromotoare între centru și periferia arborelui variază de la o secțiune transversală la alta.

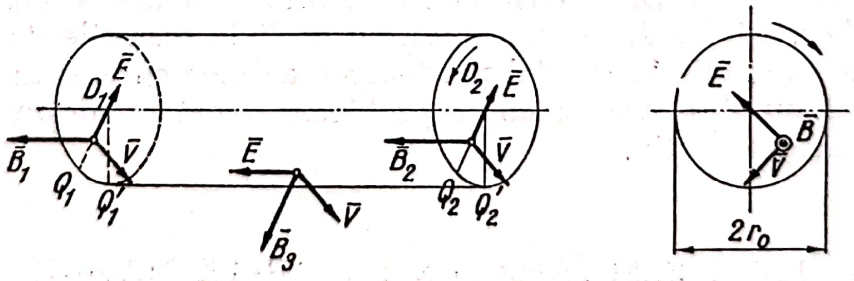


Fig. 9.2. Tensiunile electromotoare induse în arbore.

Deși tensiunea electromotoare este diferită de la o secțiune transversală la alta, nu se stabilește un curent de circulație în arbore dacă nu există o legătură exterioară între două puncte ale arborelui. În adevăr, dacă se consideră porțiunea de arbore din fig. 9.2, se poate arăta că tensiunea electromotoare în lungul conturului $O_1Q_1Q_2O_2$ este nulă.

Scanned with OKEN Scanner

Tensiunea electromotoare indusă pe latura O_1Q_1 este

$$U_{eO_1Q_1} = -\int_0^{r_0} vB_1 dr = -\int_0^{r_0} \Omega r B_1 dr = -\Omega \int_0^{r_0} rB_1 dr \tag{9.1}$$

unde Ω este viteza unghiulară a arborelui, iar B_1 inducția magnetică într-un punct oarecare al laturii O_1Q_1.

Tensiunea electromotoare indusă pe latura O_2Q_2 este

$$U_{eO_2Q_2} = -\Omega \int_0^{r_0} rB_2 dr, \tag{9.2}$$

unde B_2 este inducția magnetică într-un punct oarecare al laturii O_2Q_2.

Tensiunea electromotoare indusă pe latura Q_1Q_2 este

$$U_{eQ_1Q_2} = -\Omega \int_0^{l} r_0 B_3 dl = -\Omega r_0 \int_0^{l} B_3 dl. \tag{9.3}$$

Tensiunea electromotoare indusă pe latura O_2O_1 este nulă, deoarece viteza este nulă în centrul axului.

Tensiunea electromotoare în lungul conturului $O_1Q_1Q_2O_2$ este deci

$$U_e = U_{eO_1Q_1} - U_{eO_2Q_2} + U_{eQ_1Q_2} =$$

$$= \Omega \left[-\int_0^{r_0} rB_1 dr + \int_0^{r_0} rB_2 dr - r_0 \int_0^{l} B_3 dl \right]. \tag{9.4}$$

Dacă se consideră în cilindrul axului prisma dreaptă cu bazele $O_1Q_1Q_1'$ și $O_2Q_2Q_2'$ (fig. 9.2) și se scrie legea fluxului magnetic se obține

$$\Phi_{O_1Q_1Q_1'} - \Phi_{O_2Q_2Q_2'} + \Phi_{Q_1Q_1'Q_2Q_2'} = 0, \tag{9.5}$$

adică fluxul magnetic care intră este egal cu fluxul magnetic care iese din suprafață. Dar

$$\Phi_{O_1Q_1Q_1'} = \int B_1 dS,$$

iar

$$dS = (r\theta)dr;$$

deci

$$\Phi_{O_1Q_1O_1'} = \int_0^{r_0} \theta r B_1 dr = \theta \int_0^{r_0} rB_1 dr. \tag{9.6}$$

Scanned with OKEN Scanner

Analog,

$$\Phi_{O_2Q_2Q_2'} = \int_0^{r_0} \theta r B_2 \mathrm{d}r = \theta \int_0^{r_0} r B_2 \mathrm{d}r; \tag{9.7}$$

$$\Phi_{Q_1Q_1'Q_2Q_2'} = \int_0^{l} \theta r_0 B_3 \mathrm{d}l = \theta r_0 \int_0^{l} B_3 \mathrm{d}l. \tag{9.8}$$

Înlocuind expresiile (9.6), (9.7), (9.8) în relația (9.5), se obține

$$\int_0^{r_0} r B_1 \mathrm{d}r - \int_0^{r_0} r B_2 \mathrm{d}r + r_0 \int_0^{l} B_3 \mathrm{d}l = 0 \cdot \tag{9.9}$$

Comparînd relațiile (9.4) și (9.9), urmează că

$$U_e = U_{eO_1Q_1} - U_{eO_2Q_2} + U_{eQ_1Q_2} = 0. \tag{9.10}$$

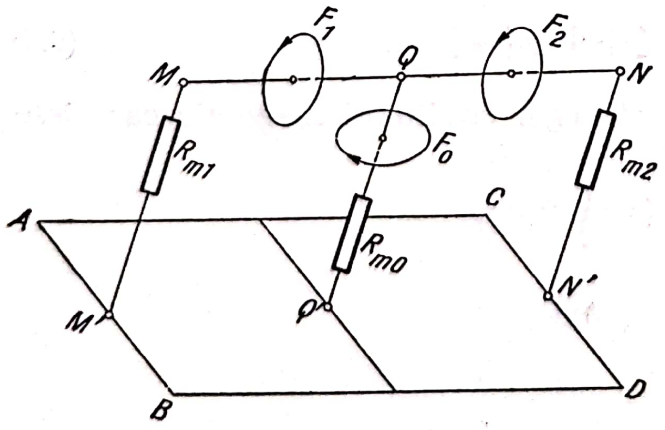
Deci tensiunea electromotoare în lungul conturului $O_1Q_1Q_2O_2$ este nulă și deci nu poate apărea nici un curent electric în arbore, în condițiile din figurile 9.1 și 9.2.

Dacă însă se stabilește o legătură exterioară de rezistență r între punctele a_1, a_2, ceea ce se produce cînd stratul de ulei sau unsoare din lagăr este străpuns în două puncte oarecare aparținînd unuia dintre lagăre sau aparținînd celor două lagăre, atunci în lungul conturului $O_1a_1ra_2O_2$ tensiunea electromotoare rezultantă este

$$U_{er} = U_{eO_1Q_1} - U_{eO_2Q_2} = -U_{eQ_1Q_2}, \tag{9.11}$$

iar $U_{eQ_1Q_2}$ dat de relația (9.3) este diferit de zero, deci în acest caz apare un curent electric. Acesta se închide prin pereții lagărului sau prin circuitul celor două lagăre legate în serie cu batiul.

Circuitul magnetic corespunzător liniilor de cîmp magnetic care se închid prin lagăre este mai complicat decît s-a arătat în fig. 9.1.



Fg. 9.3. Schema completă a circuitului magnetic corespunzător liniilor de cîmp magnetic care se închid prin lagăre.

În fig. 9.3 este dată o schemă mai exactă a circuitului magnetic corespunzător liniilor de cîmp magnetic care se închid prin lagăre. Acest circuit magnetic cuprinde: reluctanța arborelui MN, care este legat cu reluctanțele lagărelor MM' și NN' care au fost notate R_{m1} și R_{m2}, iar aici circuitul magnetic se împarte în două derivații $M'ACN'$ și $M'BDN'$ corespunzătoare celor două laturi ale batiului. Inductorul și indusul formează o derivație centrală QQ',

iar reluctanța R_{m0} este realizată de întrefierul polilor principali și eventual de întrefierul polilor auxiliari.

Tensiunile magnetomotoare care produc fluxurile din circuitul magnetic sînt F_1, F_2, F_0. Dacă aceste tensiuni magnetomotoare sînt cunoscute, se pot calcula fluxurile din circuitul magnetic. Nu este necesar să se ia în considerare separat cele două derivații $M'ACN'$ și $M'BDN'$, deoarece reluctanțele acestor derivații sînt neglijabile față de reluctanțele principale.

Tensiunile magnetomotoare F_1 și F_2 sînt produse de circuitele închise care înlănțuie arborele și aceste circuite sînt constituite fie de conexiunile între perii și între borne și perii, fie de legăturile între înfășurările mixte (compund) sau între înfășurările polilor auxiliari.

Tensiunea magnetomotoare F_0 nu există în realitate, ci reprezintă o tensiune magnetomotoare echivalentă, care este produsă de nesimetrii ale reluctanțelor sub diferiții poli (adică întrefier neuniform) sau de nesimetrii ale solenațiilor diferiților poli. Această tensiune magnetomotoare echivalentă rezultă dintr-o schemă mai completă a circuitului magnetic, corespunzătoare liniilor de cîmp magnetic care se închid prin lagăre, în cazul întrefierului neuniform. Dacă se presupune de exemplu, că întrefierul este mai mic în partea inferioară și mai mare în partea superioară, atunci reluctanța corespunzătoare zonei inferioare a întrefierului R'_{mo} este mai mică, iar reluctanța corespunzătoare zonei superioare R''_{mo} este mai mare. Analog, și reluctanțele de o parte și de alta a aceluiași lagăr pot fi inegale. Rezultă schema circuitului magnetic din fig. 9.4.

Dacă întrefierul este uniform, atunci reluctanțele R'_{m0} și R''_{m0} sînt egale și pot fi considerate ca legate în paralel și se obține $R_{m0} = \frac{1}{2} R'_{m0} = \frac{1}{2} R''_{m0}$. Analog, $R_{m1} = \frac{1}{2} R'_{m1} = \frac{1}{2} R_{m1}$; $R_{m2} = \frac{1}{2} R'_{m2} = \frac{1}{2} R''_{m2}$ și rezultă schema circuitului magnetic din fig. 9.3.

În ramurile R'_{m0} și R''_{m0} din fig. 9.4 trece un flux magnetic cu atît mai mare cu cît diferența dintre R'_{m0} și R''_{m0} este mai mare, deci cu cît este mai mare neuniformitatea întrefierului. În mod corespunzător s-a introdus în fig. 9.3 tensiunea magnetomotoare F_0, pentru a se lua în considerare acest flux magnetic determinat de neuniformitatea întrefierului. Această chestiune va fi tratată mai amînunțit la paragraful următor.

În mașinile de curent continuu de mare intensitate, se urmărește reducerea tensiunilor magnetomotoare arătate sau evitarea lor, aranjînd în mod judicios diferitele legături ale circuitelor de mare intensitate astfel, încît nici un circuit electric închis să nu înlățuie circuitul magnetic arbore-lagăre-batiu.

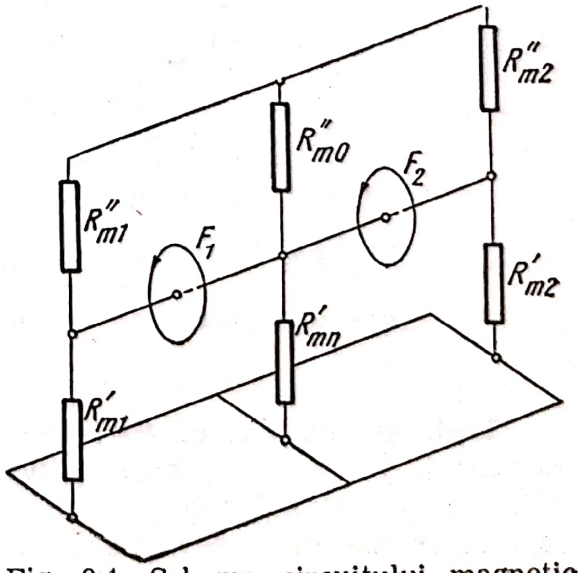


Fig. 9.4. Schema circuitului magnetic corespunzător liniilor de cîmp magnetic care se închid prin lagăre, în cazul întrefierului neuniform.

În concluzie, la mașinile de curent continuu de mare intensitate este recomandabil să se izoleze lagărele de batiu. Astfel, se evită posibilitatea apariției în circuitul arbore-lagăre-batiu a unui curent electric care poate produce distrugerea lagărelor sau cel puțin o încălzire suplimentară a lagărelor, ceea ce le reduce durata de funcționare.

Izolarea palierelor de batiu nu asigură însă în mod complet evitarea apariției curenților în arbore și anume, nu poate evita curenții care se închid prin același lagăr. De aceea este cel mai recomandabil să se examineze curenții rezultanți în jurul arborelui și să se adopte o dispunere convenabilă a legăturilor dintre perii și borne, astfel încît să se reducă sau să se evite circuite cu curenți care înlănțuie arborele.

Se va arăta cum se poate obține o așezare convenabilă a legăturilor dintre perii și borne la un generator de curent continuu cu patru poli, pentru a suprima apariția curenților din lagăre.

În fig. 9.5 sînt reprezentate legăturile între perii și borne la un generator cu patru poli. În fig. 9.5, *a* legătura cu circuitul exterior este realizată cu ajutorul a două conductoare așezate sub arbore, iar legătura între periile de aceeași polaritate este realizată cu două inele concentrice.

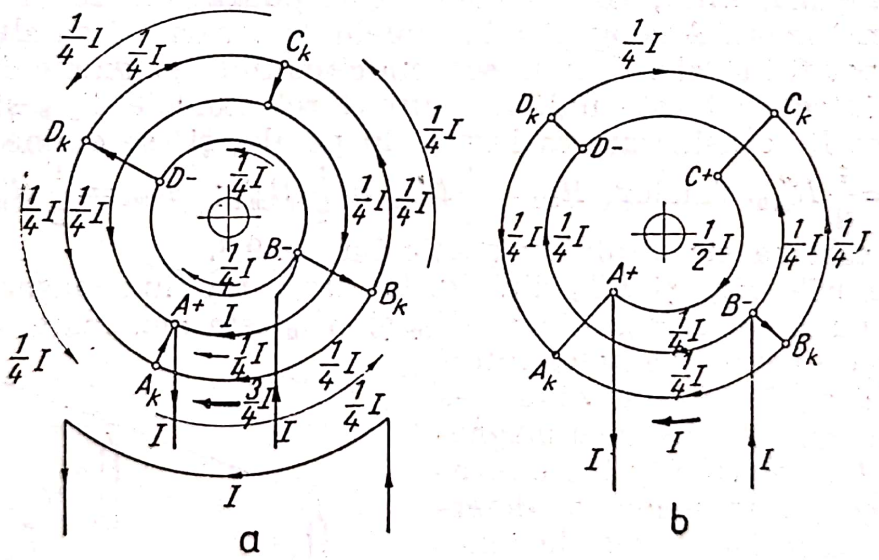


Fig. 9.5. Legăturile între perii și borne, la un generator de curent continuu cu patru poli:
a — cu un curent *I*/4 care înlănțuie arborele; *b* — fără un curent care să înlănțuie arborele.

Trebuie adăugat că în schema legăturilor nu s-a inclus înfășurarea indusului. În adevăr, acest lucru nu este de loc necesar, deoarece înfășurarea indusului împreună cu legăturile la colector, formează un circuit în formă de cerc care înlănțuie arborele, dar tensiunea magnetomotoare produsă de acest circuit este nulă, deoarece curenții sînt alternativi de sens contrar în punctele A_k, B_k, C_k, D_k, care reprezintă lamelele sub perii.

Scanned with OKEN Scanner

Urmărind conductoarele parcurse de curent, se constată că în cele trei intervale de un sfert de cerc din partea superioară B_kC_k, C_kD_k, D_kA_k suma curenților este aceeași și anume, este egală cu un curent de intensitate $\frac{1}{4}I$ în sensul antiorar, iar în intervalul de un sfert de cerc A_kB_k suma curenților este egală cu un curent de intensitate $\frac{3}{4}I$ în sensul orar.

În intervalul de un sfert de cerc A_kB_k, curentul de intensitate $\frac{3}{4}I$ poate fi înlocuit prin suma a doi curenți, unul de intensitate $\frac{1}{4}I$ în sensul anteriorar (care formează cu ceilalți curenți de aceeași intensitate din celelalte trei sferturi de cerc o spiră închisă, parcursă de un curent de intensitate $\frac{1}{4}I$ în sensul antiorar în jurul arborelui) și alt curent de intensitate I în sensul orar (care împreună cu conductoarele de legătură la circuitul exterior, formează o spiră închisă parcursă de curentul de intensitate I în sensul orar, dar care nu înlănțuie arborele).

Prima spiră este activă deoarece înlănțuie arborele și deci contribuie la producerea curenților din lagăre. A doua spiră nu este activă, deoarece nu înlănțuie arborele și deci nu contribuie la producerea curenților din lagăre.

În fig. 9.5, *b* este reprezentată o altă așezare a legăturilor. Aici periile de polaritate negativă B și D sînt legate cu un inel, iar periile de polaritate A și C sînt legate cu un semiinel, așezat sub arbore.

Urmărind conductoarele parcurse de curent, se constată că în cele trei intervale de un sfert de cerc din partea superioară, B_kC_k, C_kD_k, D_kA_k curentul total este nul, iar în intervalul de un sfert de cerc din partea inferioară A_kB_k este egal cu un curent de intensitate I în sensul orar și formează cu conductoarele de legătură la circuitul exterior o spiră închisă parcursă de curentul de intensitate I. Aceasta este însă o spiră inactivă, deoarece nu înlănțuie arborele și deci nu contribuie la producerea curenților din lagăre.

Este interesant de relevat că așezarea nesimetrică a legăturilor între perii, din fig. 9.5, *b* nu produce o spiră activă în jurul arborelui, iar așezarea simetrică a legăturilor între perii, din fig. 9.5, *a* produce o spiră activă în jurul arborelui, care determină apariția de curenți în circuitul arbore-lagăre-batiu.

9.3. CURENȚII ELECTRICI DIN LAGĂRELE MAȘINILOR DE CURENT CONTINUU SAU ALTERNATIV PRODUȘI DE NESIMETRIA ÎNTREFIERULUI

În arbore poate apărea un flux magnetic produs de nesimetrii ale polilor mașinii. Aceste nesimetrii pot fi determinate de faptul că polii nu au aceeași solenație sau de faptul că întrefierul nu este același sub fiecare pol și deci reluctanțele diferiților poli nu sînt egale.

Scanned with OKEN Scanner

Fluxul care apare în arbore în acest caz poate fi calculat utilizînd schema circuitului magnetic din fig. 9.6 pentru o maşină cu patru poli. Cele două lagăre de reluctanţă R_{m11} şi R_{m12} împreună cu suporţii şi o porţiune din arbore sînt legate în derivaţie între miezul rotorului reprezentat prin punctul O şi carcasă, inclusiv batiul reprezentat prin punctul O', toate aceste derivaţii fiind presupuse de reluctanţă neglijabilă.

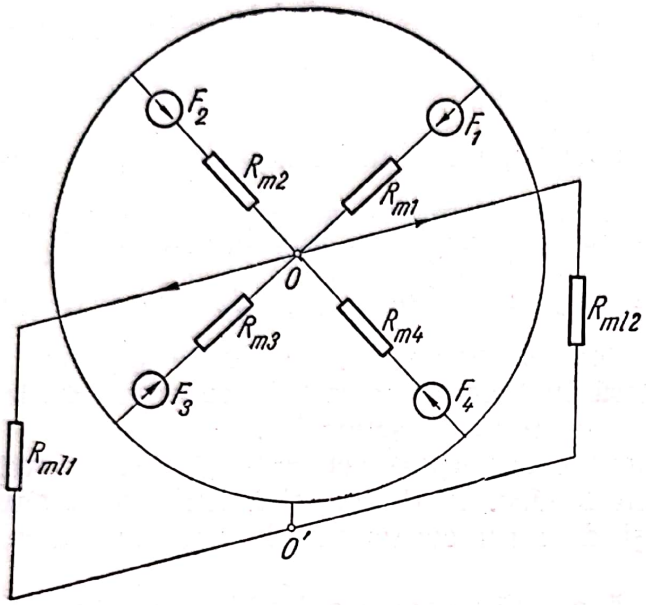


Fig. 9.6. Schema circuitului magnetic pentru calculul fluxului în arborele unei maşini cu patru poli, cînd există o nesimetrie magnetică.

Între punctele O şi O' sînt legate ramurile circuitului magnetic şi s-au reprezentat tensiunile magnetomotoare ale polilor şi reluctanţele corespunzătoare. Dacă aceste tensiuni magnetomotoare şi reluctanţele au aceleaşi valori pe toate ramurile, rezultă că punctele O şi O' sînt la acelaşi potenţial, iar prin lagăre nu trece nici un flux. Dacă însă ele au valori diferite, atunci apare o diferenţă de potenţial magnetic între punctele O şi O' iar prin lagăre trec linii de cîmp magnetic.

Se poate menţiona că în cazul de faţă (fig. 9.6) liniile de cîmp magnetic de la cele două capete de arbore sînt orientate în sens contrar în arbore, iar în cazul precedent (fig. 9.3) liniile de cîmp magnetic sînt orientate în acelaşi sens.

După cum s-a arătat în paragraful precedent, în arbore apar tensiuni electromotoare deoarece fiecare secţiune transversală prin arbore reprezintă un disc conductor care se învîrteşte în cîmpul magnetic perpendicular la suprafaţa discului.

Tensiunile electromotoare sînt orientate de la arbore spre periferie pentru un lagăr şi de la periferie spre arbore pentru celălalt lagăr. Deci tensiunile electromotoare se adaugă în circuitul celor două lagăre, în timp ce în cazul anterior se scădeau, iar dacă se produce o străpungere a stratului de unsoare sau ulei din lagăre, tensiunile electromotoare produc curenţi de acelaşi sens în întreg circuitul.

În cazul maşinii de curent continuu şi al generatorului sincron fluxul care apare în arbore este continuu, deoarece cîmpul magnetic prezintă tot timpul aceeaşi nesimetrie în raport cu circuitul magnetic.

În cazul maşinii asincrone, din cauza alunecării, cîmpul magnetic îşi modifică tot timpul poziţia în raport cu nesimetria circuitului magnetic, de aceea fluxul magnetic din arbore şi lagăre este alternativ. De aceea tensiunile electromotoare (şi curenţii) din arbore şi lagăre sînt con-

Scanned with OKEN Scanner

tinue la mașina de curent continuu și la mașina sincronă și sînt alternative la mașina asincronă.

Tensiunile electromotoare (și curenții) produse din motivele descrise sînt în general puțin importante la mașina de curent continuu și la mașina sincronă, exceptînd cazul cînd există nesimetrii exagerate; în schimb, pot fi mult mai importante la mașina asincronă unde datorită valorii mici a lățimii întrefierului, la o excentricitate mică la montare, apare o nesimetrie pronunțată a cîmpului magnetic.

9.4. CURENȚII ELECTRICI ALTERNATIVI DIN LAGĂRELE MAȘINILOR DE CURENT ALTERNATIV PRODUȘI DE CURENȚI ELECTRICI CARE FORMEAZĂ SPIRE ÎNCHISE ÎN JURUL ARBORELUI

La mașinile de curent alternativ pot apărea curenți alternativi care înlănțuie arborele, în același mod în care la mașinile de curent continuu pot apărea curenți continui care înlănțuie arborele. Prin urmare, dacă statorul mașinii de curent alternativ conține o înfășurare ondulată care constituie una sau mai multe spire care înlănțuie arborele, pot apărea astfel de curenți. La o construcție perfect simetrică a unei mașini trifazate, curentul total care înlănțuie arborele este nul, deoarece suma valorilor instantanee ale curenților din cele trei faze este nulă. La o mașină monofazată sau trifazată dar nesimetrică sau parcursă de un sistem de curenți nesimetric, curentul total care înlănțuie rotorul poate fi diferit de zero.

Tensiunea magnetomotoare produsă de acest curent stabilește un cîmp magnetic care se închide prin arbore, lagăre-batiu sau carcasă, după cum s-a explicat în cazul mașinii de curent continuu, însă în cazul de față cîmpul magnetic este alternativ. Acest cîmp magnetic poate fi considerat distribuit după suprafețe cilindrice de revoluție, concentrice cu arborele. Dacă rotorul este în repaus, acest cîmp magnetic alternativ induce în arbore tensiuni electromotoare statice, datorite variației în timp a fluxului magnetic, care stabilesc curenți electrici concentrici cu axa arborelui, iar acești curenți produc un cîmp magnetic care potrivit regulei lui Lenz se opune cîmpului magnetic inductor.

Dacă rotorul nu se învîrtește, tensiunea electromotoare statică indusă și curenții corespunzători nu depind de turația arborelui.

Cînd rotorul este în mișcare de rotație, atunci în afară de tensiunea electromotoare statică se induc în arbore și tensiunile electromotoare dinamice. În fiecare secțiune trasversală a arborelui, între centrul arborelui și periferie se induc tensiuni electromotoare determinate de rotația arborelui în cîmpul magnetic, în modul explicat pentru mașina de curent continuu. Tensiunile electromotoare dinamice sînt proporționale cu turația.

Tensiunile electromotoare statice stabilesc curenți care produc pierderi în arbore, lagăre, batiu datorită efectului termic.

Scanned with OKEN Scanner

Tensiunile electromotoare dinamice pot stabili curenți care să se închidă prin arbore, lagăre, batiu, numai în condițiile expuse pentru mașina de curent continuu.

Pierderile totale în cazul curenților alternativi produși de un cîmp magnetic alternativ în lagăre sînt în general neglijabile. În adevăr, curenții alternativi care pot înlănțui arborele sînt mici comparativ cu curenții continui care pot înlănțui arborele mașinilor de curent continuu de intensitate mare, iar cînd curenții alternativi sînt totuși importanți, fluxul magnetic din arbore este mult slăbit de reacția curenților induși static în arbore de variația în timp a acestui flux alternativ, după cum s-a arătat mai înainte, în timp ce la mașina de curent continuu fluxul magnetic se stabilește în arbore, care are o reluctanță de obicei foarte mică, și de aceea poate atinge deseori valori relativ mari.

9.5. CURENȚII ELECTRICI INDUȘI DE UN FLUX ALTERNATIV CARE ÎNLĂNȚUIE CIRCUITUL ARBORE-LAGĂRE-BATIU

Curenții alternativi din lagăre, induși de un flux alternativ care înlănțuie circuitul arbore-lagăre-batiu sînt cei mai importanți în mașinile de curent alternativ și pot apărea și la unele mașini de curent continuu.

Fluxul alternativ este produs de existența îmbinărilor repartizate uniform în pachetul de tole al indusului, construcție care se utilizează la mașinile cu diametru mare, unde nu este posibil să se execute tola indusului dintr-o singură bucată, ci din segmente.

Se va examina efectul îmbinărilor segmentelor de tole ale unui generator sincron. În fig. 9.7 este reprezentată schematic o secțiune transversală printr-un generator sincron cu patru poli, care are două îmbinări ale circuitului magnetic al tolelor statorului.

Cîmpul magnetic al unui pol nord, care în fig. 9.7, *a* se află înclinat la 45°, se împarte în două: cîmpul magnetic cu fluxul Φ'' care trece prin porțiunea jugului statoric fără îmbinare și cîmpul magnetic cu fluxul Φ'' care trece prin porțiunea jugului statoric unde există îmbinare. Fluxurile magnetice Φ' și Φ'' nu sînt egale, deoarece reluctanțele corespunzătoare diferă datorită prezenței îmbinărilor, care au efectul unor întrefieruri. Diferența dintre fluxurile Φ' și Φ'' se micșorează cînd polul se apropie de verticală sau de orizontală și devine nulă cînd polul se află în axa verticală sau în axa orizontală, deoarece atunci liniile de cîmp magnetic nu intersectează îmbinările.

În situația reprezentată în fig. 9.7, *a*, cînd polii fac un unghi de 45° cu axele orizontală și verticală, dacă fluxul dat de un pol este 2Φ, atunci fluxul cîmpului magnetic cu liniile de cîmp orizontale este Φ, iar fluxul cîmpului magnetic cu liniile verticale este Φ''. Dar $2\Phi = \Phi' + \Phi''$ și deci $\Phi' = \Phi + \varphi$ și $\Phi'' = \Phi - \varphi$, unde s-a notat cu φ componenta fluxului care reprezintă nesimetria.

Scanned with OKEN Scanner

În fig. 9.7, *b* este reprezentată repartiția liniilor de cîmp magnetic și este pusă în evidență descompunerea în fluxurile Φ și φ. Rezultă că în circuitul magnetic al statorului există patru fluxuri egale Φ, opuse două cîte două, care dau o rezultantă nulă în jurul arborelui și fluxul φ de jur împrejurul statorului. Deci, în circuitul magnetic al statorului există un flux magnetic φ care înlănțuie circuitul electric format de arbore, lagăre, batiu, carcasa statorului.

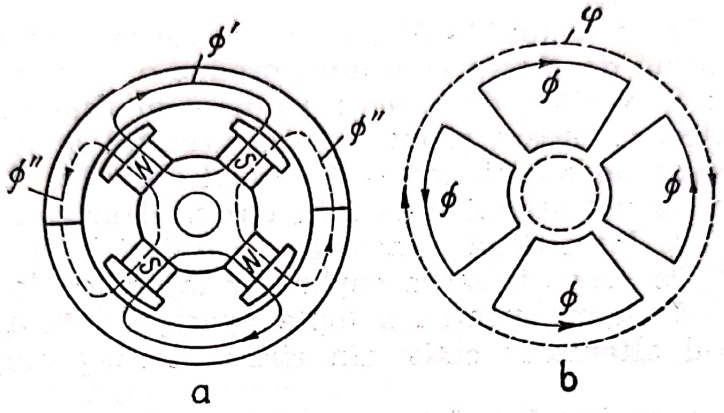


Fig. 9.7. Liniile de cîmp magnetic într-un generator sincron cu patru poli și două îmbinări ale circuitului magnetic al statorului în plan orizontal:
a — liniile cîmpului magnetic în cazul real; *b* — liniile pulul magnetic descompus în componente.

Fluxul magnetic φ este alternativ și are valoarea maximă cînd polii sînt la 45° față de planul îmbinărilor și valoarea zero cînd polii coincid cu planul îmbinărilor.

Fluxul alternativ φ induce în circuitul electric arbore, lagăre, batiu, o tensiune electromotoare statică de aceeași frecvență ca și fluxul. Frecvența fluxului φ este determinată de raportul dintre numărul de îmbinări și numărul de poli.

De exemplu, în cazul fig. 9.7, *a* dacă ar exista patru îmbinări în loc de două, atunci fluxurile Φ′ și Φ″ ar fi egale, deoarece ar fi determinate de reluctanțe egale și atunci $\varphi=0$.

Pentru ca să apară în circuitul magnetic al statorului un flux magnetic alternativ φ activ, care să inducă o tensiune electromotoare în circuitul arbore-lagăre-batiu, este necesar ca raportul dintre numărul de îmbinări n_i și numărul de perechi de poli $k=\frac{n_i}{p}$, după ce se efectuează toate simplificările, să reprezinte o fracție ordinară $k=\frac{m}{n}$ cu numărătorul m un număr impar. Dacă k este număr întreg, atunci nu apare un flux alternativ activ.

Frecvența fluxului φ și a curenților induși f_i este egală cu produsul dintre frecvența de rotație $f_0=\frac{pn}{60}$ și numărătorul m, adică $f_i=mf_0$.

Scanned with OKEN Scanner

Dacă circuitul magnetic al tolelor statorului nu este realizat din porțiuni îmbinate, ci din segmente de tole suprapuse decalat, adică se realizează circuitul magnetic țesut, atunci se obține un număr de îmbinări egal cu dublul numărului de segmente n_s, deci $n_i=2n_s$ și sînt valabile observațiile de mai înainte.

Aceste rezultate stabilite pentru generatorul sincron la care indusul este fix, sînt cu totul aplicabile și la mașinile de curent continuu la care indusul este mobil.

Îmbinările din inductor, indiferent dacă acesta este de mașină sincronă sau de mașină de curent continuu, produc o nesimetrie continuă și nu alternativă a fluxurilor, de aceea nu apare un flux activ care să inducă tensiuni electromotoare și curenți în circuitul arbore-lagăre-batiu.

Este important de menționat că în cazul fluxului activ alternativ, curenții electrici se pot stabili numai în circuitul arbore-lagăre-batiu și nu se pot stabili și între două puncte ale aceluiași lagăr, ca în cazurile tratate anterior. De aceea izolarea suporților lagărelor față de batiu reprezintă o măsură sigură, pentru a evita apariția curenților alternativi produși de fluxul alternativ activ din circuitul magnetic al statorului.

Exemplu. Să se stabilească dacă în cazul cînd numărul de îmbinări este 2 sau 4 poate apărea un flux alternativ activ, care să inducă curenți alternativi în circuitul arbore-lagăre-batiu în cazul unei mașini cu o pereche de poli.

Se calculează raportul stabilit mai înainte,

$$k=\frac{n_i}{p}=\frac{2}{p} \text{ pentru } n_i=2;$$

$$k=\frac{n_i}{p}=\frac{4}{p} \text{ pentru } n_i=4.$$

Pentru $n_i=2$, rezultă că în cazul cînd $p=1$ sau $p=2$ numărul k este întreg, deci nu apare un flux activ; dacă $p>2$, apare însă un flux activ.

Pentru $n_i=4$, rezultă că în cazul cînd $p=1$, 2, 4 numărul k este întreg, deci nu apare un flux activ; dacă $p=3$ sau $p>4$, apare însă un flux activ.

Scanned with OKEN Scanner

BIBLIOGRAFIE

1. Bruev, I. V.; Popov, V. P.: *O samozapuske asinhronnîh dvigatelei ot transformatora soizmerimoi moşcinosti.* În: Promîşlennaia Energetika, 24, nr. 4, 1969, pp. 12—14.
2. Sîromiatnikov, I. A.: *Rejimî rabotî asinhronnîh i sinhronnîh elektrodvigatelei.* Gosenergoizdat, Moskva, 1963.
3. Mauduit, A.: *Machines électriques.* Tome II. Edit. Dunod, Paris, 1931.
4. Kemper, M. J.: *Operating Experiences with Three-Phase Motors an Single-Phase Lines.* În: I.E.E.E. Transactions on Industry and General Applications. Nov.-Dec., nr. 6, 1966, pp. 443—445.
5. Nicolaide A.: *Maşini asincrone cu circuitul secundar nesimetric.* În: Electrotehnica, 4, nr. 12, 1956, p. 545—550.
6. Nicolescu, E., Răduţ, C.: *Maşini electrice fabricate în R. P. Română.* Edit. Tehnică, Bucureşti, 1965.
7. Nicolaide, A.: *Erwärmung massiver Läufer von Synchronmaschinen beim asynchronen Anlauf.* În: Elektrotechnische Zeitschrift, ETZ-A, 86, 1965, 23, pp. 760—763.
8. Nicolaide, A.: *Unterschung der Dämpferwicklung und des natürlichen Dämpfersystem der Schenkelpol-Synchronmaschinen.* În: Arhiv für Elektrotechnik, 53, nr. 2, 1969, pp. 100—120.
9. Nicolaide, A., Drăgănescu, O.: *Caracteristicile de pornire ale motoarelor sincrone cu poli aparenţi masivi.* În: Electrotehnica, 11, nr. 6, 1963, pp. 215—225.
10. Nicolaide, A.: *Caracteristicile de funcţionare în asincron ale maşinilor sincrone cu poli masivi.* În: Studii şi Cercetări de Energetică şi Electrotehnică, 15, nr. 3, 1965, pp. 663—689.
11. Sîromiatnikov, I. A.: *Regimurile de funcţionare ale motoarelor asincrone* (Traducere din limba rusă). Edit. Tehnică, Bucureşti, 1952.
12. Gheorghiu, I. S.: *Maşini electrice.* Edit. Ministerului Învăţămîntului şi Culturii, Bucureşti, 1958.
13. Parteni-Antoni, C.: *Curs de maşini electrice.* Edit. Institutului Politehnic, Iaşi, 1951.
14. Fransua, Al.: *Maşini electrice uzuale.* Edit. Didactică şi pedagogică, Bucureşti, 1962.
15. Nürnberg, W.: *Die Asynchronmaschine. Ihre Theorie und Berechnung unter besonderer Berücksichtigung der Keilstab-und Doppelkäfigläufer,* Edit. Springer, Berlin, Göttingen, Heidelberg, 1952.
16. Richter, R.: *Maşini Electrice, vol. IV. Maşini asincrone.* (Traducere din limba germană), Edit. Tehnică, Bucureşti, 1960.
17. Karpov, F. F.: *Cum se verifică posibilitatea conectării la reţea a motoarelor electrice în scurtcircuit* (Traducere din limba rusă). Edit. Tehnică, Bucureşti, 1961.

Scanned with OKEN Scanner

18. Papocchia, R.: *Influenza delle variazioni di tensione sue funzionamento dei motori asincroni trifasi.* În: Ingegneri (Italia), vol. 9, nr. 50, sept. oct. 1968, pp. 56—58.
19. Wauchope, G. A.: *A recent Development in Squirrel-Cage Induction Motor Starters.* În: Journal, Institution of Electrical Engineers, London, vol. 91, Part. II, 1944, pp. 101—107.
20. Abdel-Hamid, M. N.: *Improved Starting Process Alternative to Conventional Star — Delta Switching of A-C Motors.* În: IEEE Transactions on Industry and General Applications, 65, March 1963, pp. 52—60.
21. Piotrovski, I. M.: *Maşini electrice* (Traducere din limba rusă). Edit. Energetică de Stat, Bucureşti, 1953.
22. Liwschitz-Garik, M., Whipple, C. C.: *A-C Machines.* Edit. Van Nostrand, Toronto, New-York, London, 1961.
23. Kostenko, M. P., Pietrovski, I. M.: *Elektriceskie maşinî.* Vol. II. Izdatelstvo Energiia, Moskva, Leningrad, 1967.
24. Harwood, P. B.: *Control of Electric Motors.* New-York, 1963.
25. Berchet, M.: *Metodă nouă de pornire a electromotoarelor asincrone de joasă tensiune cu rotorul în scurtcircuit şi aplicarea acesteia pe şantierele de petrol şi gaze.* În: Electrotehnica, 13, 1965, nr. 7, pp. 253—258.
26. Cotorogea, D.: *Verificarea condiţiilor de autopornire a motoarelor electrice asincrone în scurtcircuit.* În: Electrotehnica, 13, nr. 5, 1965, pp. 173—177.
27. Hramov, N. Ia.: *Diagrama samozapuska elektrodvigatelei.* În: Elektriceskie stanţii, 39, nr. 11, 1968. pp. 50—53.
28. Litvac, L. V.: *Problema ameliorării factorului de putere în întreprinderile industriale.* (Traducere din limba rusă). Edit. Energetică de Stat, Bucureşti, 1951.
29. Sand, M., Nicolaide, A., Boroş, I.: *Contribuţii la studiul sincronizării motoarelor asincrone.* În: Studii şi realizări electrotehnice. Institutul Tehnic, Craiova, 1957, pp. 9—28.
30. Novikov, A. V., Kiureghian, S. G.: *Emkostnoe samovozbujdenie asinhronnogo generatora.* În: Izvestiia Vestnik Ucebnîh Zavedenii, Elektromehanika. 10, nr. 2, 1967, pp. 173—179.
31. Bystron, K.: *Einflüsse von Strom — und Spannungsoberschwingungen eines Zwischenkreisumrichters auf Asynchronmaschinen.* În: Siemens Zeitschrift, 41, nr. 3, 1967, pp. 244—247.
32. Tappenheiner, H.: *Stromrichter mit Thyristoren.* În: Energie und Technik, 19, nr. 2, 1967, pp. 48—53.
33. Li, K. Y. G.: *Analysis and operation of an invertor — fed variable — speed induction motor.* În: Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 116, nr. 9, 1969, pp. 1 571—1 580.
34. Zweygberk, S. von, Sokolov, E.: *Verlustermittlung im stromrichtergespeisten Asynchronmotor.* În: Elektrotechnische Zeitschrift, ETZ-A, Bd. 90, H. 23, 1969, pp. 612—616.
35. Natalkin, A. V.: *Preobrazovatel ciastotî dlia regulirovaniia asinhronnogo dvigateli na osnove invertora toka s iskustvennoi komutaţiei.* În: Vestnik Ucebnîh Zavedenii, Elektromehanika, 9, nr, 10, 1966, pp. 1 101—1 108.
36. Bishop, K. W. J., Spreadbury, R. J.: *Static invertors-recent developments and new applications.* În: Electron. and Power., 1968, 14, pp. 280—283.
37. Tanatar, A. I.: *Metodî regulirovaniia skorosti asinhronnîh dvigatelei.* Izdatelstvo Tehnika, Kiev, 1968.
38. Kostenko, M. P.: *Elektriceskie maşinî. Speţialnaia ciast.* Gosenergoizdat, Moskva, Leningrad, 1949.
39. Adamenko, A. I.: *Metodî issledovaniia nesimmetricinîh asinhronnîh maşin,* Izdatelstvo Naukova Dumka, Kiev, 1969.
40. Sturman, G. I.: *Razomknutie belici kletki v korotkozamknutîh asinhronnîh dvigateliah.* În: Electricestvo, nr. 9, 1951, p. 36—43.
41. Nicolaide, A., Drăgănescu, O.: *Influenţa saturaţiei asupra caracteristicilor de pornire în asincron ale maşinilor sincrone cu poli aparenţi.* În: Electrotehnica, 18, nr. 4, 1970, pp. 121—128.

Scanned with OKEN Scanner

42. Loginov, S. I.: *Issledovaniie sistem vozbujdeniia sinhronnîh dvigatelei s dvuhobmotocinîmi kompaundiruiuşcimi transformatorami.* În cartea: Rascet i issledovanie sistem vozbujdeniia sinhronnîh maşin. Izdatelstvo Akademii Nauk SSSR, Moskva, Leningrad, 1963.
43. Vajnov, A. I..: *K voprosu ob ucete perehodnîh proţessov pri rascete nekotorîh sistem vozbujdeniia sinhronnîh generatorov.* În cartea: Rascet i issledovanie sistem vozbujdeniia sinhronnîh maşin. Izdatelstvo Akademii Nauk SSSR, Moskva, Leningrad, 1963.
44. Glebov, I. A.: *Osnovnîe napravlenii rabot v oblasti sistem vozbujdeniia sinhronnîh maşin.* În cartea: Rascet i issledovanie sistem vozbujdennia sinhronnîh maşin. Izdatelstvo Akademii Nauk SSSR, Moskva, Leningrad, 1963.
45. Barrel, A., Boulet, R. Carpentier, L.: *Recent Progress and New Possibilities for the Excitation and the Regulation of Large Synchronous Machines.* CIGRE, Report, No. 157, 1962.
46. Achenbach, H.: *Der Einsatz von Stromrichtern zur Erregung von Synchronmaschinen.* În: Siemens Zeitschrift, H. 4, 1962.
47. Mark, K.: *Die neue Reihe der AEG — Synchronmaschinen mittlerer Leistung.* AEG Mitteilungen, No. 3/4, 1961.
48. Dautheville, F.: *Excitation des moteurs synchrones. Généralités et excitation par sémiconducteurs.* În: Revue Générale de l'Électricité, 76, nr. 11, 1967, pp. 1 337—1 340.
49. Géralde, P.: *Excitation des moteurs synchrones par redresseurs électroniques tournants.* În: Revue Générale de l'Électricité, 76, nr, 11, 1967, pp. 1 341—1 348.
50. Corbyn, D. B. Holburn, W. W., Seydel, G. M. H.: *Rectifiers Excitation for Large Turbo-Alternators.* În: Electrical Times, 7, dec., 1961.
51. Girault, P.: *Les courants de palier dans les machines à courant continu et à courant alternatif.* În: Bulletin de la Société Internationale des Electriciens, février, avril, 1915, pp. 45—61, novembre, pp. 323—351.
52. Mauduit, A.: *Machines électriques.* Tome I. Edit. Dunod, Paris, 1931.
53. Haus, O.: *Wellenspannungen und Lagerströme, ihre Uhrsache, Wirkung und Abhilfemassnahmen.* În: Elktrotechnische Zeitschrift, ETZ-A, 85, 1964, pp. 106—112.
54. Stork, P.: *Beitrag zur Theorie der elektromagnetischen Körperschallerzeugung bei Drehstrom — Käfigläufermotoren mittlerer Leistung.* Diss. Technische. Hochschule, Hannover, 1960.
55. Jordan, H., Taegen, F.: *Wellenflüsse infolge von Schwankungen des Luftspaltleitwertes.* În: Elektrotechnische Zeitschrift, ETZ-A, 85, 1964, pp. 865—867.
56. Bendl, J.: *Der Einfluss der Luftspaltexzentrizität auf die Zahnpulsationsverluste beim Asynchronmotor.* În: Acta Technica CSAV, 14, nr. 1, 1969, pp. 78—91.
57. Fransua, Al.: *Maşini şi acţionări electrice.* Edit. Didactică şi Pedagogică, Bucureşti, 1967.
58. Gheorghiu, I. S., Fransua, Al.: *Tratat de maşini electrice.* Vol. 1. *Maşini de curent continuu.* Edit. Academiei R. S. România, Bucureşti, 1968.
59. Alexeev, A. E.: *Construcţia maşinilor electrice* (traducere din limba rusă). Edit. Tehnică, Bucureşti, 1951.
60. Rădulet, R.: *Motoarele electrice.* Extras din instrucţiunile pentru electricieni. Tipografia Românească, Timişoara, 1943.
61. Heinrich, A.: *Douăzeci de trepte pe scara dezvoltării uzinei.* În: Comunicări tehnice Electroputere, Craiova, 1970.
62. Cojocaru, I. ş.a.: *Elemente originale în construcţia de transformatoare la uzina Electroputere.* În: Comunicări tehnice Electroputere, Craiova, 1970.
63. Moisa, M. ş.a.: *Transformatoare cu două şi trei înfăşurări în gama 25—63 MVA destinate să funcţioneze în condiţii speciale de eforturi electrodinamice.* În: Comunicări tehnice Electroputere, Craiova, 1970.
64. Cojocaru I. ş.a.: *Serii şi construcţii speciale de transformatoare de distribuţie, destinate necesităţilor interne şi exportului.* În: Comunicări tehnice Electroputere, Craiova, 1970.
65. — *Insrucţiuni de montaj şi punere în funcţiune a transformatoarelor de putere în ulei din gama 4—25 MVA.* — Craiova, 1970.

Scanned with OKEN Scanner

66. — *Nomenclatorul de verificări, încercări şi probe privind montajul, punerea în funcţiune şi darea în exploatare a instalaţiilor energetice.* (Editat de Ministerul Energiei Electrice, Oficiul de documentare şi publicaţii tehnice, Bucureşti, 1967.
67. — *Regulament pentru punerea în exploatare a construcţiilor şi instalaţiilor energetice.* Ministerul Energiei Electrice, Oficiul de documentare şi publicaţii tehnice, Bucureşti, 1967.
68. — *Normativ de încercări şi măsurări la echipamente şi instalaţii electrice la punerea în funcţiune şi exploatare.* Ministerul Energiei Electrice, Oficiul de documentare şi publicaţii tehnice, Bucureşti, 1967.
69. Farbman, S. A., Bun, A. I.: *Repararea şi modernizarea transformatoarelor* (traducere adaptă şi completată din limba rusă). Editura Tehnică, Bucureşti, 1963.
70. Ghemke, R. G.: *Defectele maşinilor electrice* (Traducere din limba rusă). Editura Tehnică, Bucureşti, 1960.
71. — *Instrucţiuni de întreţinere şi exploatare a motoarelor electrice asincrone cu rotor în scurtcircuit, de la 0,75 la 10 kW.* Uzina Electroprecizie,, Săcele, 1970.
72. — *Instrucţiuni de montaj, punere în funcţiune şi exploatare a motoarelor electrice.* Uzina de maşini electrice, Bucureşti, 1970.
73. — *Instrucţiuni de montaj şi punere în funcţiune a motoarelor asincrone.* Uzina Electroputere, Craiova, 1970.
74. — *Regulament de exploatare tehnică a centralelor şi reţelelor electrice.* Ministerul Energiei Electrice, Oficiul de documentare şi publicaţii tehnice, Bucureşti, 1967.
75. — *Normativul 3E-1-67.* Ministerul Energiei Electrice, Oficiul de documentare şi publicaţii tehnice, Bucureşti, 1967.
76. — Instrucţiuni de montaj şi exploatare pentru maşini sincrone cu lagăre pe rulmenţi şi arbore orizontal. Uzina Electroputere, Craiova, 1960.
77. Lăzăroiu, F. D., Bichir N.: *Zgomotul maşinilor şi transformatoarelor electrice.* Editura Tehnică, Bucureşti, 1968.
78. Grumăzescu, M., Stan, A., Wagner, N., Marinescu, V.: *Combaterea zgomotului şi vibraţiilor.* Editura Tehnică, Bucureşti, 1964.
79. Melehova, E., Ruşanu, C.: *Periile şi portperiile maşinilor electrice.* Editura Tehnică, Bucureşti, 1964.
80. Năstase, S.: *Controlul şi încercarea bobinajelor de maşini electrice.* Editura Tehnică, Bucureşti, 1965.
81. Müller, R.: *Les problèmes du bruit dans les machines tournantes électriques* În: Revue ACEC, nr. 1, 1969.
82. Bălă, C., Fetiţa, A., Lefter, V.: *Cartea bobinatorului de maşini electrice.* Editura Tehnică, Bucureşti, 1967.
83. Jezierski, E., Gogolevski, Z., Kopczynski, Szmit J.: *Transformatoare electrice. Construcţie şi proiectare* (traducere din limba polonă, adaptată şi completată) Editura Tehnică, Bucureşti, 1966.
84. Delahaye, J., Vuarchez, I. P.: *Les isolants stabilisés et les possibilités d'échauffement des transformateurs.* În Revue Générale de l'Électricité, 74. nr. 9, sept. 1965, p. 744—748.
85. Fabre, J., Pichon, A.: *Deteriorating processes and products of paper in oil.* În: Application to transformer CIGRÉ, Paris, 1960, Raport nr. 137.
86. Langlois Berthelot: *Factors affecting the thermal performance of oil immersed transformed windings.* CIGRÉ, Paris, 1962, Raport nr. 135.
87. Meser, H. P. *Trocknung und intgasung der in Hochspannungs Leistungstransformatoren werwendeten Isolierstoffe.* În: Elektrotechnische Zeitschrift (ETZ-A), 81, nr. 2, ian. 1960, p. 41—47.
88. Ganger, B.: *Kontrolle der Isolierölalterung und Pflege des Oeles von Nochspannungstransformatoren und Messwandlern.* În: Elektrotechnische Zeitschrift (ETZ-A), 84, nr. 24, dec. 1963, p. 800—803.
89. Stannet, W. A.: *Problems of Water in Power Transformer.* În: Electrical Times, 147, mart, 1965, p. 433—438.
90. Weiss, H., Salomon, T.: *Rapport sur l'activité du Comite d'études,* nr. 1, *Huiles isolantes.* CIGRÉ, Paris, 1964, Raport nr. 136.

Scanned with OKEN Scanner

91. Müller, R.: *Auswirkung der Alterungsvorgänge in Transformatoren und Möglichkeiten zur Erhöhung der Alterungsbeständigkeit* În: Elektrotechnische Zeitschrift (ETZ-A), 84, nr. 24, dec. 1963, p. 794—800.
92. Hornsby, A. E.: *Operation of Transformers at high temperatures* În: Procedings I.E.E., 112, nr. 3, mart. 1965, p. 586—589.
93. Ciubotaru, T.: *Uscarea, impregnarea și conservarea în exploatare a izolației transformatoarelor de mare putere.* Institutul Central de documentare tehnică, București, 1967.
94. Pucikovskii, V. V.: *Rezistența electrică a uleiului de transformator la acțiunea supratensiunilor de comutare.* În: Energetika i transport, nr. 1, ian-febr. — 1969, p. 148—151.
95. Nanda, J. R., și Krisnaswamy, K. R.: *Factorii care influențează deterioarea uleiului de transformator:* În: Electrical Times, vol. 154, nr. 25, dec. 1968. p. 855—860.
96. Putschkowski, W. W.: *Efectul umezirii uleiului de transformator asupra tensiunii de străpungere.* În: Archiv für Energie-Wirtschaft, vol. 22, nr. 24, dec. 1968, p. 1 098—1 102.

LISTA

standardelor referitoare la mașini electrice și transformatoare de putere

2551-69 Instalații de producere a energiei electrice. Puteri, terminologice.
6877-68 Echipamente electrice cu protecție antiexplozivă și antigrizutoasă. Condiții tehnice pentru construcție și încercări.
541-68 Conductoare de bobinaj de cupru și aluminiu, izolate cu bumbac sau mătase.
6163-68 Conductoare de bobinaj de cupru și aluminiu, izolate cu hîrtie.
5924-70 Conductoare de bobinaj rotunzi de cupru, izolate prin emailare. Metode de încercare.
685-68 Sîrmă rotundă de cupru. Conductoare de bobinaj.
2873-68 Sîrme și bare dreptunghiulare din cupru și benzi din cupru pentru scopuri electrotehnice.
6247-60 Materiale electroizolante pentru mașini și aparate electrice. Clasificare în funcție de stabilitatea termică.
4297-66 Aparate și utilaje electrice. Curenți normali.
5325-70 Grade normale de protecție ale utilajelor electrice clasificare și simbolizare.
6588-62 Metode de încercare.
4861-55 Mașini electrice rotative și transformatoare. Terminologie.
8198-68 Găuri de centrare filetate pentru arborii mașinilor electrice.
8143-68 Generatoare și convertizoare de curent continuu pentru sudare cu arc electric. Condiții generale.
7814-73 Mașini electrice de curent continuu. Metode de încercare.
3432-52 Mașini electrice rotative. Capete de ax conice. Forme și dimensiuni.
1893-72 Mașini electrice rotative. Condiții generale.
1399-61 Mașini electrice rotative. Glisiere.
625-71 Mașini electrice rotative. Grade normale de protecție.
7301-65 Mașini electrice rotative. Metode de măsurare a nivelului zgomotului.
7681-66 Mașini electrice rotative. Metode pentru determinarea debitului gazelor de răcire.
3998-53 Mașini electrice rotative. Tipuri constructive. Terminologie și simboluri.
7536-71 Mașini electrice rotative. Metode de măsurare a nivelului vibrațiilor.

Scanned with OKEN Scanner

Risc.

8274-68	Mașini electrice rotative. Nivele admisibile de zgomot.
4199-71	Mașini electrice rotative. Perii și portperii. Dimensiuni.
3528-71	Mașini electrice rotative. Plăcuțe indicatoare.
8498-69	Mașini electrice rotative. Presgarnituri pentru cutii de borne. Dimensiuni.
4296-54	Mașini electrice rotative. Terminologia subansamblelor și pieselor componente.
5700-64	Mașini electrice rotative de curent continuu pentru nave. Condiții speciale.
8211-68	Mașini electrice sincrone trifazate. Metode de încercare.
7006-64	Mașini electrice trifazate cu putere de la 0,1 la 400 kW și tensiunea nominală pînă la 600 V. Determinarea rezistenței statorului fără deconectarea mașinii de la rețea.
6968-69	Motoare asincrone trifazate cu regim de funcționare intermitent destinate acționărilor instalațiilor de ridicat și transportat. Condiții generale.
7246-65	Motoare asincrone trifazate de la 0,5 kW la 10 000 kW. Metode de încercare.
1764-70	Motoare asincrone trifazate normale de la 0,6 pînă la 100 kW și pînă la 500 V. Caracteristici electrice.
7120-65	Motoare asincrone electrice trifazate pentru macarale cu inele de contact, cu puteri de la 3 kW pînă la 60 W și tensiuni pînă la 500 V. Dimensiuni de montaj.
2755-69	Motoare asincrone trifazate normale, închise, cu puteri de la 0,06 kW pînă la 132 kW. Dimensiuni de montaj.
7005-64	Motoare electrice asnicrone trifazate 0,1 pînă la 10 000 kW. Determinarea momentului de inerție al rotorului.
881-71	Motoare electrice asincrone trifazate de la 0,06 la 132 kW. Puteri, tensiuni și turații nominale.
6587-68	Motoare electrice asincrone trifazate normale de la 160 la 1000 kW. Puteri, tensiuni și turații nominale.
8476-69	Dimensiuni demontaj.
5679-68	Motoare electrice de curent continuu pentru tracțiune urbană. Condiții generale.
7007-64	Motoare electrice trifazate asincrone și sincrone de la 0,1 la 10 000 kW. Determinarea creșterii temperaturii la tensiunea nominală și cu rotorul calat.
6991-64	Motoare sincrone trifazate normale de la 100 la 1000 kW. Puteri, tensiuni și turații nominale.
8457-69	Plăci de borne pentru mașini electrice rotative de joasă tensiune. Dimensiuni.
5680-71	Transformatoare electrice. Grade normale de protecție.
3532-73	Transformatoare mici. Condiții generale.
3035-65	Transformatoare de putere. Metode de încercare.
8242-68	Metode de încercare ale releului cu gaze.
1703-67	Transformatoare de putere în ulei. Condiții generale.
4001-65	Transformatoare de putere de la 25—1600 VA și pînă la 35 kV. Gabarite și distanțe între roți.
440-62	Transformatoare de putere, trifazate în ulei. Caracteristici electrice.
2689-71	Transformatoare pentru sudare cu arc electric. Condiții generale.
811-72	Ulei readitivat pentru transformatoare și întreruptoare electrice.
1608-72	Unsori pe bază de săpunuri de Na și Ca pentru rulmenți.
7543-66	Lacuri și emailuri electroizolante de impregnare și acoperire. Metode de analiză și încercări.

1.01.2001

from I.P.